

Reihe KLIMOPASS-Berichte

Projektnr.: 4500292143/23

**Abschätzung der Wirkung
von Anpassungs- und Minderungsmaßnahmen
in Ballungsräumen Baden-Württembergs**

von

B. Brecht, H.-J. Panitz und G. Schädler

Finanziert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Januar 2017

KLIMOPASS

– Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

| | |
|--|---|
| HERAUSGEBER | LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe |
| KONTAKT KLIMOPASS | Dr. Kai Höpker, Daniel Schulz-Engler Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Tel.:0721/56001465, klimopass@lubw.bwl.de |
| FINANZIERUNG | Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Programm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg (KLIMOPASS) |
| BEARBEITUNG UND VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT | Gerd Schädler, Benedict Brecht und Hans-Jürgen Panitz Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Bereich Troposphäre Karlsruher Institut für Technologie, Postfach 3640, 76021 Karlsruhe |
| BEZUG | http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/ ID Umweltbeobachtung U83-W03-N32 |
| STAND | Januar 2017, Internetausgabe Januar 2017 |

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autorinnen und Autoren. Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Nachdruck für kommerzielle Zwecke - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

Inhalt

| | |
|--|----|
| Inhalt..... | 3 |
| Zusammenfassung..... | 5 |
| 1 Motivation und Zielsetzung..... | 7 |
| 2 Vorgehensweise | 9 |
| 3 Stadtklima und anthropogener Wärmeeintrag..... | 10 |
| 4 Modelle und Daten..... | 13 |
| 4.1 COSMO-CLM..... | 13 |
| 4.2 Verwendete Antriebsdaten | 14 |
| 4.3 Das Boden-Vegetationsmodell Veg3d..... | 15 |
| 4.4 Parameter für das Landoberflächenmodell | 16 |
| 4.5 Implementierung des anthropogenen Wärmeeintrags in Veg3d als Term in der Energiebilanz | 16 |
| 5 Untersuchungsgebiet und Landnutzungen | 18 |
| 5.1 Simulations- und Untersuchungsgebiet | 18 |
| 5.2 Bodenarten und Landnutzungen..... | 18 |
| 5.3 Szenarios der künftigen Landnutzung | 18 |
| 5.3.1 Worst Case Szenario (WCS) | 19 |
| 5.3.2 Best Case Szenario (BCS) | 19 |
| 6 Stand alone-Simulationen mit Veg3d..... | 21 |
| 6.1 Test des anthropogenen Wärmeeintrags..... | 21 |
| 6.2 Zyklisches Spin-up | 22 |
| 7 Validierung mit ERA40-Reanalysen | 23 |
| 8 Läufe mit dem gekoppelten Modellsystem CLM-Veg3d | 26 |
| 8.1 Allgemeine Bemerkungen zu den Simulationen | 26 |
| 8.2 Kontrollzeitraum Gesamtgebiet: Vergleich mit Beobachtungen | 26 |
| 8.3 Projektionszeitraum mit Istzustands(Referenz-)bebauung..... | 28 |
| 8.4 Zukunftszeitraum mit Bebauungsverdichtung (Worst Case Szenario WCS) | 33 |
| 8.5 Vergleich 5-Jahreszeitraum mit 30-Jahreszeitraum | 36 |
| 8.6 Zukunftsszeitraum mit nachhaltiger Bebauung (Best Case Szenario BCS)..... | 38 |
| 9 Gegenüberstellung der Auswirkungen des Klimawandels und der Auswirkungen von Landnutzungsänderungen im Stadtgebiet Stuttgart..... | 39 |
| 10 Weiterer Forschungsbedarf..... | 41 |
| 11 Literatur..... | 42 |



Zusammenfassung

Ein wichtiger Aspekt heutiger Stadtplanung ist der Einfluss des Klimawandels auf das städtische Klima und damit das Wohlbefinden der Stadtbewohner. Das hier vorgestellte Projekt zielt darauf ab, die kombinierten Auswirkungen von Klimawandel und stadtplanerischen Maßnahmen auf das Stadtklima herauszuarbeiten. Diese Untersuchungen wurden mit Hilfe des regionalen Klimamodells COSMO-CLM, gekoppelt mit dem detaillierten Boden-Vegetationsmodell (SVAT) Veg3d, für die Stadt Stuttgart und ihr Umland durchgeführt. Die städtische Bebauung wurde durch eine genauere Landnutzungsklassifizierung und den zusätzlich eingebauten anthropogenen Wärmeeintrag in Veg3d erfasst. Es wurden gekoppelte Simulationen mit einem horizontalen Gitterboxabstand von 0.025° (ca. 2.8 km) für einen Kontrollzeitraum (1981-2010) und einen Projektionszeitraum (2021-2050) durchgeführt. Um die Spannweite des Einflusses städtischer Bebauung auf das lokale Klima zu untersuchen, wurden verschiedene stadtplanerische Szenarien verwendet: die Referenzprojektion beinhaltet die (gegenwärtige) Landnutzung des Kontrolllaufes, um den alleinigen Effekt des Klimawandels zu quantifizieren. Für den Projektionszeitraum wurde ein ‚worst case‘ Szenario (WCS) mit einer Zunahme und Verdichtung der bebauten Flächen entwickelt. Ergänzend wurde ein ‚best case‘ Szenario mit einer Erweiterung entsiegelter Flächen und reduziertem Energieverbrauch erstellt, welches allerdings nur für den Zeitraum 2021-2025 gerechnet werden konnte.

Um die erfolgreiche Implementierung der Änderungen an Veg3D zu testen, wurden zunächst stand-alone-Simulationen durchgeführt, bei denen das Bodenmodell von Atmosphärendaten eines vorherigen gekoppelten Laufes angetrieben wird, aber keine Rückwirkung auf die Atmosphäre hat. Wie erwartet ergab sich eine mittlere Zunahme der Bodentemperatur von ca. 3 K in den obersten Schichten bei Berücksichtigung von anthropogener Wärme. Hierbei zeigte sich jedoch, dass die Temperatur in den tieferen Schichten nach einem Jahr noch einen Trend aufweist, weshalb für den Kontrolllauf ein zyklisches Einschwingen von Veg3D vorgenommen wurde. Dazu wurde Veg3D von den atmosphärischen Daten eines gekoppelten Laufes des ersten Simulationsjahres 1978 viermal hintereinander zyklisch angetrieben. In einem weiteren Schritt wurden in den stand-alone-Simulationen die Auswirkungen des ‚best case‘ und ‚worst case‘ Szenarios getestet. Sie resultierten in einer mittleren Temperaturabnahme von ca. 2.5 K (best case szenario) bzw. einer Temperaturzunahme um ca. 1 K (worst case szenario) gegenüber der Referenzsituation.

Die gekoppelten Simulationen ergaben für das Stadtgebiet Stuttgart und die untersuchten Zeiträume eine Zunahme der mittleren Temperatur von etwa 0.7 K gegenüber dem Kontrollzeitraum. Im ‚worst case‘-Szenario erhöhte sich diese Zunahme um maximal 0.1 K (im Flächenmittel war praktisch keine Änderung zu beobachten). Geringfügige Änderungen durch den Klimawandel traten außerdem für Globalstrahlung, spezifische Feuchte und Gesamtbewölkung auf.

Für das gesamte Untersuchungsgebiet, also die Stadt Stuttgart und ihre nähere Umgebung, ergaben sich an einzelnen Gitterboxen mit geänderter Landnutzung Unterschiede, die im

Bereich des Klimawandelsignals und darunter liegen. Dort war jedoch bereits das Klimawandelsignal klein, was die Relevanz der Änderungen, die auf die Bebauungsszenarien zurückzuführen sind, schmälert.

Als Ergebnis dieser Studie lässt sich festhalten, dass der Klimawandel das Stadtklima Stuttgarts auf der Skala von Stadtquartieren, also im Kilometerbereich, stärker prägen wird als Bebauungsänderungen. Lokal- und mikroklimatisch (d.h. auf räumlichen Skalen im Bereich von Metern) können sich durch Bebauungsänderungen allerdings sehr wohl Unterschiede mit Auswirkungen z.B. auf Wärmebelastung, Wohnqualität und Gebäudeenergiebedarf ergeben. Solche Untersuchungen wären mit mikroskaligen Modellen unter Verwendung der hier erstellten Daten möglich. Insgesamt bestätigt sich, dass Bebauungsverdichtung die Wärmebelastung erhöht, Auflockerung dagegen reduziert. Auswirkungen der Bebauungsänderungen auf den Niederschlag sind nicht zu erkennen, ebenso wenig Auswirkungen auf das gesamte Stadtgebiet.

Die hier erzielten Ergebnisse müssten in verschiedener Hinsicht weiter abgesichert werden; auf den sich aus dieser Studie ergebenden weiteren Forschungsbedarf wird in Abschnitt 10 eingegangen

1 Motivation und Zielsetzung

Einige Ballungsgebiete in Baden-Württemberg, wie z.B. der Großraum Stuttgart mit seiner Kessellage liegen in klimatisch ungünstigen Zonen, vor allem unter dem Aspekt der thermischen Belastung und des Luftaustauschs. Da in diesen Ballungsräumen eine große Zahl von Menschen lebt und arbeitet, sollten bereits im Vorfeld städtebaulicher Planungen die positiven und negativen Auswirkungen der Maßnahmen auf das Klima der Stadt und ihres Umfeldes abgeschätzt werden können.

Das Stadt- und Umlandklima wird außer von den großskaligen Klimaverhältnissen stark von lokalen Faktoren wie Bebauungsstruktur, Versiegelung, anthropogenem Wärmeeintrag, Begrünung usw. bestimmt; die Analyse von Beobachtungen zeigt sowohl klimawandelbedingte langfristige Trends als auch regionale Unterschiede in bebauten Gebieten (z.B. Schlünzen et al., 2011). Um die Auswirkungen von Maßnahmen abschätzen zu können, wäre es wünschenswert, die großskaligen Effekte von den regional/lokalen trennen zu können. Auf der Haus- und Straßenskala lassen sich Änderungen nur schwer einzelnen Faktoren zuordnen, während auf größeren Skalen (Skala von Stadtquartieren, Kilometerbereich) eine deutlichere Trennung möglich scheint. Daher konzentriert sich diese Studie auf die im Kilometerbereich aggregierte Situation, in der mikroskalige Effekte herausgefiltert sind, und untersucht die Auswirkungen verschiedener Planungs- bzw. Bebauungsszenarios bei sich veränderndem Klima. Diese Betrachtung auf „mittleren“ Skalen kommt der Idee der ganzheitlichen Planung auf Quartier- und Stadtteilebene auch insofern entgegen, als sie es erlaubt, sowohl die aggregierten Änderungen im Stadtgebiet als auch die Auswirkungen auf das Umland qualitativ und quantitativ zu erfassen. Die Verwendung verschiedener Planungsvarianten (Referenz, „Best Case“, „Worst Case“) ermöglicht es, die Bandbreite der Auswirkungen zu erfassen.

In diesem Projekt soll das Zusammenwirken von klimawandelbedingten Änderungen einerseits und planungsbedingten Änderungen andererseits auf das Klima eines Ballungsgebiets am Beispiel des orographisch stark gegliederten Großraums Stuttgart mit Hilfe von Modellrechnungen untersucht werden. Hierzu werden Klimasimulationen mit dem regionalen Klimamodell COSMO-CLM für einen Kontrollzeitraum (1981 - 2010) und einen Projektionszeitraum (2021 und 2050) in der hohen Auflösung von 2.8 km durchgeführt und die Ergebnisse im Hinblick auf die genannte Fragestellung ausgewertet. Abgesehen davon, dass Aussagen über die zukünftige Entwicklung nur mit Modellen zu machen sind, haben validierte Modellrechnungen auf physikalischer Basis gegenüber stadtklimatischen Messungen weitere Vorteile: sie erlauben flächendeckende statistische Aussagen im Gegensatz zu episodischen und nur lokal aussagefähigen Messfahrten und sie liefern in sich konsistente Daten, z.B. bezüglich Temperatur und Feuchte.

Es geht in dieser Arbeit zunächst darum, städtebauliche Maßnahmen auf der Skala von Stadtquartieren und größer sowie die Wechselwirkung Stadt-Umland zu untersuchen und die relativen Beiträge von Stadtumbau und Klimawandel festzustellen – es wird also kein

gebäudeauflösendes Stadtmodell verwendet. Diese Vorgehensweise und die entsprechenden Analysen sind auf Baden-Württemberg mit seiner ausgeprägten Orographie und seine klimasensitiven Regionen zugeschnitten, und wie bereits in der Vergangenheit, können die Daten neben der Vorbereitung und Planung von Maßnahmen auch für nachgeschaltete Studien verwendet werden. Aufgrund der kurzen Projektlaufzeit konnten die eigentlich notwendigen Ensemblesimulationen zur Erfassung der Unsicherheit nicht durchgeführt werden, so dass die hier vorgestellten Ergebnisse nur als erste Orientierung zu verstehen sind.

2 Vorgehensweise

Um die kombinierten Auswirkungen von Landnutzungsänderungen und Klimawandel auf den Ballungsraum Stuttgart zu untersuchen, wurden die in der folgenden Tabelle 2.1 aufgeführten Klimasimulationen mit dem Regionalmodell COSMO-CLM mit einer Auflösung von 2.8 km durchgeführt und hinsichtlich der Temperatur-, Feuchte- und Niederschlagsklimatologien ausgewertet. Dabei waren vor allem die Änderungen im Stadtgebiet von Interesse.

| | |
|---|--|
| Kontrollzeitraum 1981-2010, Bebauung Istzustand | Zukunftszeitraum 2021-2050, Bebauung Istzustand (Referenz) |
| | Zukunftszeitraum 2021-2050, Bebauung ‚worst case‘-Szenario |
| | Zukunftszeitraum 2021-2025, Bebauung ‚best case‘-Szenario; Vergleich mit 1971-1975 |

Tabelle 2.1: die durchgeführten Klimasimulationen

Durch den Vergleich der in Tabelle 2.1 aufgeführten Läufe (horizontal: Änderung durch Klimawandel, vertikal: Änderung durch Bebauung) können Abschätzungen gemacht werden, wie Klimawandel und Bebauungsänderungen zusammenwirken. Zur Modellvalidierung wurde zusätzlich ein mit ERA40-Reanalysen angetriebener Kontrolllauf für den Kontrollzeitraum 1971-2000 ausgewertet.

Als globaler Antrieb wurde ein Lauf (Realisierung 1) des Globalmodells ECHAM6 verwendet; in Anbetracht der derzeitigen Emissionsentwicklung wurde das Emissionsszenario RCP 8.5 als realistisch zugrunde gelegt. Als Landoberflächenmodell wird das Modell Veg3d (Beschreibung siehe Abschnitt 4.3) verwendet, da dieses Modell Landoberflächen detailliert simuliert und flexibel an verschiedene Landnutzungs- und insbesondere Bebauungsarten angepasst werden kann. Es wird hier dynamisch über den OASIS-Koppler (Valcke 2013) mit COSMO-CLM gekoppelt. Durch die Kopplung mit COSMO-CLM kann explizit die kombinierte Wirkung von Topographie und Bebauung erfasst werden, was für Städte in topographisch gegliedertem Gelände essentiell ist. Für das vorgeschlagene Projekt werden die Landnutzungsklassen des Modells um spezifische Bebauungsklassen mit entsprechenden Parametern und Prozessen wie z.B. anthropogenem Wärmeinput erweitert. Die Variation dieser Klassen erlaubt durch Variation der Landnutzungsparameter Abschätzungen, welche positiven bzw. negativen Auswirkungen sowohl im Stadtgebiet als auch im Umland zu erwarten sind und welche Maßnahmen welche Wirkung bringen. In die Projektarbeit fließen die Erfahrungen und Ergebnisse unserer diesbezüglichen Arbeiten im Rahmen von KLIMOPASS 1 und „Herausforderung Klimawandel“ ein.

Um Randeffekte zu minimieren, wurden die hoch aufgelösten regionalen Simulationen mit einer Auflösung von 0.025° (etwa 2.8 km) für das in Abb. 2.1 gezeigte Gebiet durchgeführt und für den Raum Stuttgart (in Abb. 2.1 markiert) ausgewertet. Die zugehörige Landnutzung im Raum Stuttgart ist in Abb. 5.1 dargestellt.

Um die Auswirkungen des Klimawandels von denen der Bebauungsänderungen unterscheiden zu können, wurden die Projektionssimulationen mit den in Abschnitt 5 beschriebenen Landnutzungsszenarios gerechnet.

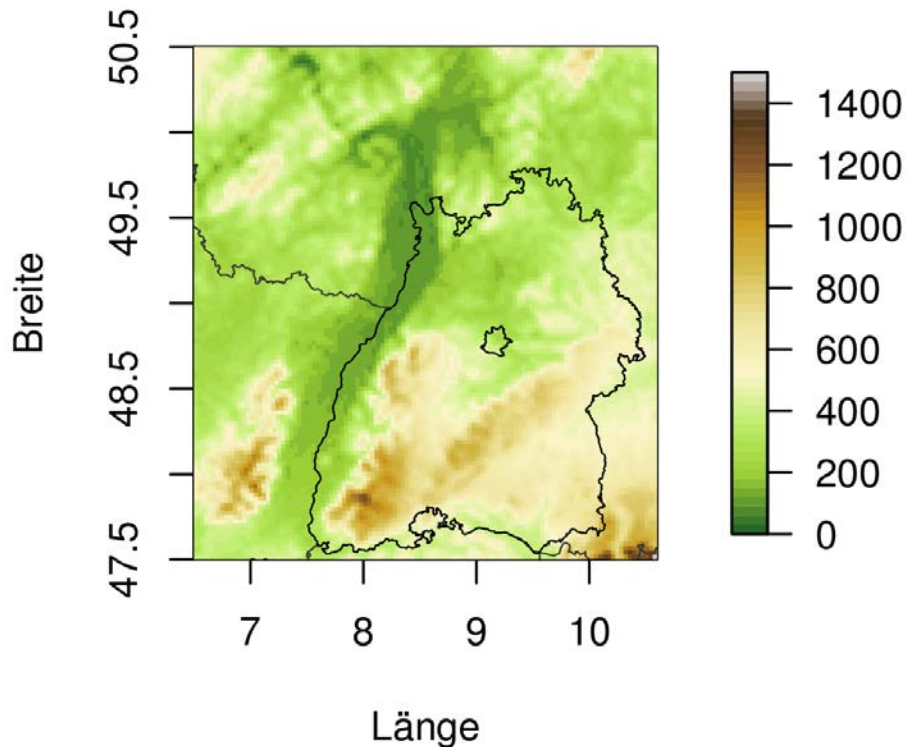


Abb. 2.1: Gesamtes Rechengebiet mit Auswertebereich für die Region Stuttgart (Stadtgebiet als Polygon).

3 Stadtklima und anthropogener Wärmeeintrag

Bedingt durch Unterschiede in Albedo, Rauigkeit, Versiegelung und anthropogene Wärmefreisetzung weichen der Wärme- und Wasserhaushalt und damit das Klima einer Stadt vom Umland in praktisch allen meteorologischen Variablen (Temperatur, Feuchte, Strahlung, Wind und Niederschlag) ab. Diese Unterschiede variieren mit der Größe, der Bebauungsstruktur, dem Freiflächenanteil und der natürlichen Geländeform (Städtebauliche Klimafibel 2012). Der veränderte Wärme- und Wasserhaushalt im Vergleich zu nicht-urbaner Landnutzung lässt sich einerseits auf das Vorhandensein von Straßen, Wohngebäuden und Industrieanlagen zurückzuführen, die den Boden versiegeln, andererseits spielt auch die meist größere Wärmespeicherfähigkeit der Stadt eine Rolle. Durch die Versiegelung von Flächen erhöht sich bei Niederschlagsereignissen der oberflächliche Abfluss, da die Oberflächen weniger Wasser aufnehmen können als ein unversiegelter Boden. Bei sehr trockenem Wetter wiederum kann ihnen nicht so viel Feuchtigkeit entzogen werden. Diese beiden Tatsachen führen dazu, dass im Mittel der Anteil des fühlbaren Wärmeflusses über einer Stadtfläche erhöht und der des latenten erniedrigt ist (Oke 1987). Hierdurch steigt die bodennahe Temperatur mit dem Versiegelungsgrad. Auf Grund der anthropogenen Erzeugung von Wasserdampf bei Verbrennungsprozessen in der Stadt ist die absolute

Feuchte dort aber trotz der reduzierten Evapotranspiration im Jahresmittel nur um 6 % geringer als in ihrem Umland. Die relative Feuchte weist jedoch als Folge der erhöhten Temperatur in der Stadt (siehe folgenden Abschnitt) deutlich niedrigere Werte auf (Städtebauliche Klimafibel 2012). In einer Stadt wird mehr Wärme produziert und gespeichert als im Umland. Dies kann einerseits auf die meist etwas größere Wärmekapazität der urbanen Materialien zurückgeführt werden, aber auch die durch die Geometrie bedingte größere Absorptionsfläche in der Stadt und der geringere latente Wärmefluss spielen eine Rolle (Oke 1987). Diese Wärme kann nachts an die Atmosphäre abgegeben werden, so dass die städtische Grenzschicht nicht so stark auskühlt wie die ihres Umlands. Dadurch ist in der Stadt auch die Differenz zwischen Maximum- und Minimumtemperatur nicht so groß wie im Umland. Diese Erscheinung der sogenannten städtischen Wärmeinsel ist also zum Teil auf unterschiedliche Eigenschaften der städtischen Oberflächen, zum Teil auf zusätzliche Wärmequellen zurückzuführen. Dementsprechend müssen in der Modellierung sowohl die Eigenschaften der Landoberflächen angepasst als auch die zusätzlichen urbanen Wärmequellen berücksichtigt werden. Die hier umgesetzte Möglichkeit, dies zu tun, ist das Modifizieren der Parameter für die Landnutzungsclass „Bebauung“ sowie das Hinzufügen eines Terms in der städtischen Energiebilanz. Zur Erläuterung zeigt Abbildung 3.1 ein um die Stadt gelegtes Kontrollvolumen zusammen mit den auftretenden Energiebilanztermen.

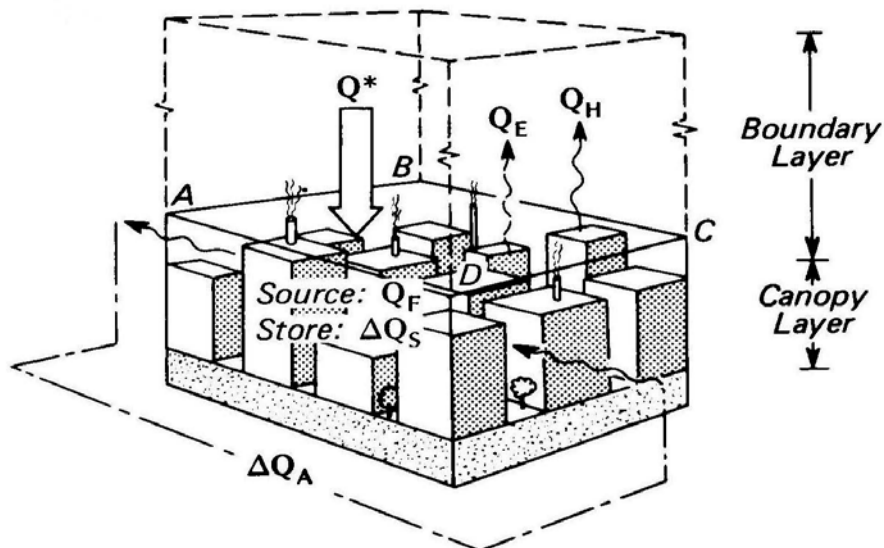


Abb. 3.1: Definition des Kontrollvolumens um eine Stadt mit den auftretenden Flüssen (aus Oke 1987).

Nach Oke (1987) kann die Energiebilanz dieses Kontrollvolumens durch folgende Gleichung dargestellt werden (Einheit W/m^2):

$$Q^* + QF = QH + QE + QB + \Delta QS + \Delta QA$$

wobei

Q^* die Netto-Gesamtstrahlung (kurzwellig+langwellig) am Oberrand des Volumens

QF der anthropogene Wärmeeintrag

QH der Fluss fühlbarer Wärme

QE der Fluss latenter Wärme

QB der Bodenwärmestrom

ΔQS Speicherung von Wärme durch die Elemente des Kontrollvolumens

ΔQA Advektion von Wärme bzw. äquivalent-latenter Wärme durch die Seiten des Kontrollvolumens (hier nur Atmosphäre)

ist.

In dieser Gleichung ist die Strahlungsbilanz Q^* positiv, wenn mehr Strahlung das Volumen erreicht als dieses emittiert oder reflektiert. Die Flüsse latenter und fühlbarer Wärme haben ein positives Vorzeichen, wenn sie aus dem Volumen heraus gerichtet sind. Gewinnt das betrachtete Volumen Wärme durch Speicherung oder Advektion, so sind ΔQS und ΔQA größer Null; in der vorliegenden Studie werden diese Terme vernachlässigt. Die anthropogene Wärmeemission QF ist nicht-negativ. Dieser Term repräsentiert die direkte Freisetzung von Wärme durch Heizung, Kraftfahrzeuge und Industrie, die in Städten deutlich größer und konzentrierter ist als auf dem Land.

4 Modelle und Daten

4.1 COSMO-CLM

Für die Simulationen wurde das COSMO-CLM Modell mit einer Auflösung von 0.025° (etwa 2.8 km) in der Version CLM5.0_clm6 verwendet. COSMO wurde vom Deutschen Wetterdienst (DWD) als Wettervorhersagemodell entwickelt und wird seit Dezember 1999 vom DWD als nationales operationelles Wettervorhersagemodell eingesetzt; es ist für mesoskalige Simulationen (ca. 2-2000 km) ausgelegt. Die Klimaversion COSMO-CLM wurde vom CLM-Konsortium in Zusammenarbeit mit dem DWD aus der Wettervorhersageversion entwickelt. Das Modell ist nichthydrostatisch und berücksichtigt alle drei Phasen von Wasser mit ihrer Umwandlung; das standardmäßig im Modell implementierte Boden-Landnutzungsmodell (SVAT) TERRA wurde für dieses Projekt durch das detailliertere SVAT Veg3d ersetzt. Konvektive Prozesse werden bei größeren Auflösungen mit einem sogenannten Konvektionsschema (in diesem Fall dem Tiedtke-Schema) parametrisiert, d.h. die Prozesse werden nicht ab initio mit physikalischen Gleichungen modelliert, sondern mit empirischen Beziehungen, welche die vom Modell berechneten Variablen verwenden, beschrieben. Bei der hier verwendeten Auflösung von 2.8 km wird nur noch die flache und mittelhohe Konvektion parametrisiert, während hochreichende Konvektion vom Modell direkt simuliert wird. Das Modell ist in Doms und Schättler (2002) und Rockel et al. (2008) sowie auf der CLM-Webseite

<http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>

genauer beschrieben.

Um die hohe Auflösung von 2.8 km zu erreichen, war ein Dreifach-Nesting der Simulationen erforderlich (Abb. 4.1): im ersten Nesting-Schritt wurden die globalen Antriebsdaten (ECHAM6) verwendet, um Simulationen für Europa mit COSMO-CLM mit einer Gitterauflösung von 50 km durchzuführen; diese wurden im zweiten Schritt verwendet, um COSMO-CLM-Simulationen mit 7 km Gitterweite durchzuführen; diese schließlich dienten im dritten Schritt als Antriebsdaten für die angestrebten 2.8 km-Simulationen. Dies ist schematisch in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Simulationen wurden jeweils für 2 Zeiträume durchgeführt:

- 1981 – 2010 (Kontrollzeitraum)
- 2021 – 2050 (Projektionszeitraum)

Zum Einschwingen des Systems (besonders der trägen Komponenten wie dem Boden) wurden die Rechnungen in den Jahren 1978 bzw. 2018 begonnen, aber nur die genannten Zeiträume ausgewertet.

4.2 Verwendete Antriebsdaten

Da ein Regionalmodell wie COSMO-CLM nur eine Teilregion der Erde simuliert, dieser Ausschnitt aber von seiner großräumigen Umgebung beeinflusst wird, muss es an seinen Rändern mit größerskaligen Daten angetrieben werden. Hierfür gibt es im Wesentlichen zwei Möglichkeiten: für die Modellvalidierung werden sogenannte Reanalysen verwendet, das sind zeitlich und räumlich regelmäßig angeordnete Daten, die mit einem Wettervorhersagemodell unter Einbeziehung von möglichst vielen Beobachtungsdaten (Datenassimilation) errechnet wurden. Sie liegen zeitlich in stündlicher Auflösung und räumlich seit etwa Mitte des letzten Jahrhunderts in einer Auflösung von etwa 200 km vor und ermöglichen es durch ihre zeitliche Kohärenz, Regionalmodelle mit Beobachtungsdaten nicht nur statistisch, sondern im Tages-, Monats- und Jahres-, d.h. Wetterbereich zu vergleichen. Im Validierungsteil der vorliegenden Studie wurden die ERA40-Reanalysen des European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMWF, Uppala et al. 2005) verwendet.

Wenn es um das Klimaänderungssignal geht, werden globale Klimaprojektionen, d.h. die Ergebnisse von globalen Klimamodellen, benötigt. Da diese jeweils nur eine Realisierung des möglichen Klimas simulieren, können Aussagen nur auf statistischer Basis über längere Zeiträume gemacht werden. Hier wurden die Klimasimulationen des MPI Hamburg mit ECHAM 6, Realisierung 1, für den Kontrollzeitraum 1978-2000 und den Projektionszeitraum 2018-2050 verwendet (die Jahre 78-81 bzw. 18-21 dienen zum Einschwingen des Modells).

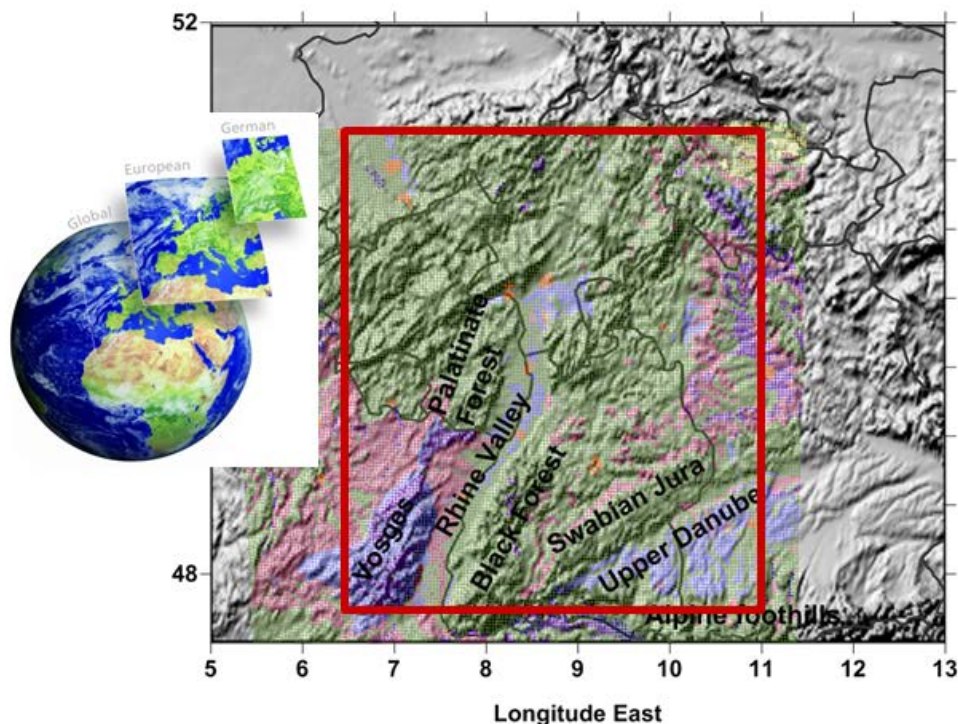


Abb. 4.1: Nestingstufen und Rechengebiet

4.3 Das Boden-Vegetationsmodell Veg3d

Um die Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und den Landoberflächen flexibler und physikalisch detaillierter zu erfassen, wurde für die Simulationen dieses Projekts das Regionalmodell COSMO-CLM nicht mit dem Standard-SVAT TERRA, sondern mit dem SVAT Veg3d betrieben, wobei die Kopplung der beiden Modelle über den externen Koppler OASIS erfolgte.

Veg3d wurde seit seiner Erstimplementierung 1989 (Schädler, 1990) am Institut für Meteorologie und Klimaforschung kontinuierlich weiterentwickelt mit dem Ziel, möglichst realistische untere Randbedingungen für Regionalmodelle wie COSMO-CLM zu liefern. Es besteht aus einer Vegetations- bzw. Bebauungsschicht ("big leaf"-Ansatz) und mehreren (meist 8 bis 10) Bodenschichten wählbarer Dicke, welche die ungesättigte Zone und einen Teil des tieferen Bodens (bis ca. 15 m Tiefe) abdecken (s. Abb. 0.2). Die thermischen und hydraulischen Bodeneigenschaften wie Albedo, Wärmeleitfähigkeit, Matrixpotential etc. sind bodenart- und bodenfeuchteabhängig formuliert, wobei verschiedene Formulierungen zur Auswahl stehen und die notwendigen Parameter entweder aus Tabellen übernommen oder selbst vorgegeben werden können. Falls vorhanden, wird Schnee durch zwei zusätzliche Schichten über dem Boden erfasst. Die Bodenschichten, die Schneeschichten und die Vegetations/Bebauungsschicht besitzen jeweils ihre eigene Energie- und Wasserbilanz, über die die jeweiligen Temperaturen, Feuchten sowie die Wärme- und Feuchteflüsse (mit stabilitätsabhängigen Austauschkoefizienten) berechnet werden. Die hier verwendete parallelisierte Version ist über den OASIS-Koppler (Valcke 2011) mit COSMO-CLM gekoppelt.

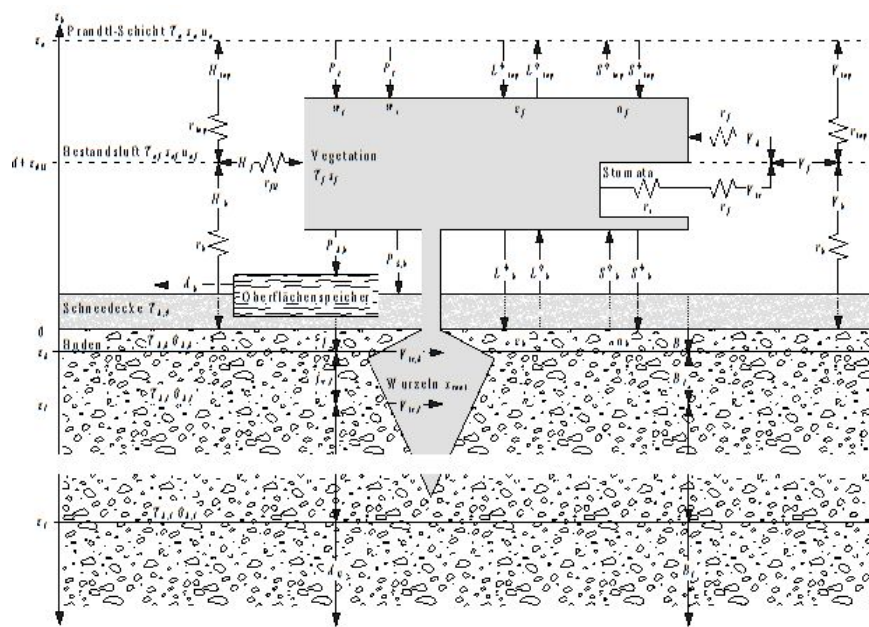


Abb. 4.2: Struktur von Veg3d.

Veg3d wurde in verschiedenen Feldexperimenten (z.B. LOTREX, AMMA (Kohler et al., 2012)) und dem SnowMIP-Projekt (Rutter et al., 2009) validiert.

4.4 Parameter für das Landoberflächenmodell

Veg3d kennt in der Standardversion 11 Landnutzungsklassen für Mitteleuropa, welche durch Parameter wie Rauigkeitslänge, Bedeckungsgrad, Blattflächenindex, Stomatawiderstand u.a., beschrieben werden: nackter Boden, Binnengewässer, besiedeltes Gebiet, Gewässer, Laubwald, Nadelwald, Mischwald, Sonderkulturen (Obst- und Weinbau), Ackerflächen, Wiesen und Weiden und eine benutzerdefinierte Klasse.

Im Zusammenhang mit der genaueren Modellierung der Bebauung und des anthropogenen Wärmeinputs wurde die Anzahl der Landnutzungsklassen für Bebauung von 1 auf 4 erhöht, so dass insgesamt 14 Landnutzungsklassen vorkommen können.

4.5 Implementierung des anthropogenen Wärmeeintrags in Veg3d als Term in der Energiebilanz

In Veg3d entspricht das in Abb. 3.1 dargestellte Kontrollvolumen einer Boden- und Landnutzungsschicht. Die in Veg3d verwendete Bodenenergiebilanz wurde daher entsprechend der Bilanzgleichung in Abschnitt 3 um den Term QF erweitert und die Bebauungsparameter (Albedo, Rauigkeit usw.) als Parameter der Landnutzungsschicht übernommen. Anthropogener Wärmeeintrag wird nur für bebauten Gebiet angesetzt. Vereinfachend wird von einem zeitlich konstanten, nur von der Bebauungsdichte abhängigen anthropogenen Wärmeeintrag ausgegangen. Dies ist die auch in der Literatur meist verwendete Vorgehensweise, da eine detailliertere Erfassung neben umfangreichen stadtspezifischen Informationen wie z.B. Wohnverteilung, Bebauungscharakteristika, Verkehrs- und Gewerbetagesgänge auch deren quantitative Umsetzung erfordern würde, was bislang nur für einige wenige Pilotstädte gemacht wurde. Vermutlich spielen solche Details auf Klimazeitskalen auch keine dominierende Rolle. Die folgenden Zahlenwerte wurden der auf umfangreichen Analysen beruhenden Arbeit von Stewart und Oke (2012), basierend auf dem Konzept der „Local Climate Zones“ (LCZ) entnommen:

| Bebauungstyp | LCZ | Anthropogener Wärmeeintrag QF in W/m^2 |
|--|-----|---|
| Lockere Wohnbebauung | 6 | 10 |
| dichte Wohnbebauung | 5 | 15 |
| Stadtkernbebauung | 1-3 | 35 |
| Lockere Gewerbebebauung | 8 | 40 |
| dichte Gewerbebebauung (nur zu Testzwecken verwendet) | 10 | 300 |

Tabelle 4.1: Anthropogener Wärmeeintrag in verschiedenen Bebauungsstrukturen.

Diese Werte stimmen recht gut mit anderen in der Literatur angegebenen Werten (z.B. Pigeon et al., 2007) überein.

Wie Abbildung 4.3 zeigt, kommt das Konzept der „Local Climate Zones“ der hier verfolgten Vorgehensweise, Landnutzungen auf einer mittleren Skala zwischen dem Meter- und dem Kilometerbereich zu aggregieren, recht nahe.

TABLE 2. Abridged definitions for local climate zones (see electronic supplement for photographs, surface property values, and full definitions). LCZs 1–9 correspond to Oke's (2004) urban climate zones.






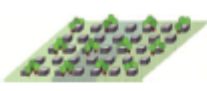
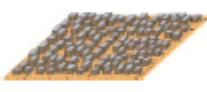



| Built types | Definition | Land cover types | Definition |
|--|--|---------------------------------------|--|
| <p>1. Compact high-rise</p>  | Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials. | A. Dense trees | Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park. |
| <p>2. Compact midrise</p>  | Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials. | B. Scattered trees | Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park. |
| <p>3. Compact low-rise</p>  | Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials. | C. Bush, scrub | Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture. |
| <p>4. Open high-rise</p>  | Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials. | D. Low plants | Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park. |
| <p>5. Open midrise</p>  | Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials. | E. Bare rock or paved | Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation. |
| <p>6. Open low-rise</p>  | Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials. | F. Bare soil or sand | Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture. |
| <p>7. Lightweight low-rise</p>  | Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal). | G. Water | Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons. |
| <p>8. Large low-rise</p>  | Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials. | VARIABLE LAND COVER PROPERTIES | |
| <p>9. Sparsely built</p>  | Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). | b. bare trees | Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo. |
| <p>10. Heavy industry</p>  | Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials. | s. snow cover | Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo. |
| | | d. dry ground | Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo. |
| | | w. wet ground | Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo. |

Abb.4.3: Local Climate Zones nach Stewart und Oke (2012). Die im Text verwendete Numerierung der Landnutzungsklassen bezieht sich auf die Nummern in der Abbildung.

5 Untersuchungsgebiet und Landnutzungen

5.1 Simulations- und Untersuchungsgebiet

Das verwendete Simulationsgebiet bei 2.8 km Auflösung ist bereits in Abb. 4.1 dargestellt. Das Simulationsgebiet ist wesentlich größer als das eigentliche Auswertebereich Großraum Stuttgart (Stuttgart Metropolitan Area, SMA) und umfasst 140 x 150 horizontale Gitterboxen. Dies hat unter anderem folgende Gründe:

- wie sich in einer Reihe von Sensitivitätsstudien gezeigt hat, ist eine Mindestgebietsgröße erforderlich, um die beim Nesting (s. Abb. 4.1) auftretenden Randeffekte zu minimieren
- Der Aufwand für diese hoch aufgelösten Simulationen ist sehr hoch. Es ist daher nicht vertretbar, für jede Fragestellung separate Simulationen durchzuführen; vielmehr müssen die Simulationen so ausgelegt sein, dass sie für mehrere Fragestellungen ausgewertet werden können. Das gezeigte Gebiet umfasst einen großen Teil des südlichen Deutschland und kann daher auch für andere Stadtgebiete sowie Fragestellungen aus den Bereichen Hydrologie, Land- und Forstwirtschaft und Risikoanalyse verwendet werden, bei denen hoch aufgelöste Daten benötigt werden.

5.2 Bodenarten und Landnutzungen

Die Bodenarten für das Gesamtgebiet wurden der „Harmonized World Soil Database“ (HWSD) (<http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/30776>) entnommen, welcher weltweit mit einer Auflösung von 1/120° (ca. 1 km) vorliegt und hier per Majoritätsverfahren auf 2.8 km aggregiert wurde. Für die Landnutzung wurde der GLC2000-Datensatz <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/glc2000.php> verwendet, wobei die dort angegebenen Landnutzungen auf die in Veg3d vorgesehenen Landnutzungsklassen und das COSMO-CLM-Gitter übertragen wurden.

5.3 Szenarios der künftigen Landnutzung

Bei einem Treffen mit der Abteilung Stadtklimatologie des Amtes für Umweltschutz der Landeshauptstadt Stuttgart im Dezember 2013 wurde das Vorgehen besprochen. Aus den zur Verfügung gestellten Unterlagen (Landnutzungsdaten als Vektordateien) wurde die aktuelle Bebauung digitalisiert und in ein Landnutzungskataster für Veg3d umgesetzt. Informationen zu künftigen Bebauungsänderungen wurden nicht zur Verfügung gestellt, daher wurden von uns für das Worst Case Szenario (WCS) und Best Case Szenario (BCS) plausible Annahmen auf der Grundlage der bestehenden Bebauung getroffen. BCS und WCS werden im den folgenden Abschnitten beschrieben. Die Szenarios sollten einerseits im Bereich des Möglichen liegen, andererseits aber auch bezüglich Versiegelung, Grünanteil und Wärmeinput die best- bzw. schlechtestmöglichen Situationen abdecken. Die

Auswirkungen einer konkreten Bebauungsänderung sollten daher innerhalb der mit diesen Szenarios ermittelten Grenzen liegen.

5.3.1 Worst Case Szenario (WCS)

Diesem Szenario liegt eine intensivierete Urbanisierung zugrunde. Daher wurden für das Worst Case Szenario (WCS) folgende Flächenumwidmungen vorgenommen:

- Bebauungsverdichtung: aus LCZ 5 wird LCZ 2 (vgl. Abb. 4.3)
- Alle ländlichen Gitterboxen mit mindestens zwei Nachbarn aus LCZ 8 oder LCZ 10 werden mit LCZ 6 bebaut
- Alle anderen ländlichen Gitterboxen mit mindestens zwei Nachbarn aus den Klassen LCZ 2, 5, 6, 8 oder 10 gehen in LCZ 6 über
- Alle Gitterboxen der Klasse LCZ 6 mit mindestens vier urbanen Nachbarn gehen in LCZ 5 über
- An der Bodenarttypisierung wurde außer in der Zuordnung urbaner Klassen nichts geändert.

5.3.2 Best Case Szenario (BCS)

Für dieses Szenario konnte aus Zeitgründen nicht die gesamten Zeiträume 1981-2010 und 2021-2050 gerechnet werden, vielmehr war nur ein Vergleich 1971-1975 mit 2021-2025 möglich. Es wird der Vollständigkeit hier ebenfalls vorgestellt, auch weil sich zeigt, daß für den Vergleich von Bebauungsszenarios Aussagen auch bei kürzeren Zeiträumen möglich sind (siehe Abschnitt 8.6). Das Best Case Szenario geht vom Rückbau urbaner Flächen, hier durch Wiederaufforstung repräsentiert, und von reduziertem Energieverbrauch, modelliert durch reduzierten anthropogenen Wärmeeintrag, aus. Zur Umsetzung dieses Szenarios wurde eine Kombination von Landnutzungsänderungen und Änderung der Parameter der urbanen Klassen verwendet. Als Landnutzungsänderung wurde nur eine Aufforstung im Südosten des Gebiets vorgenommen. Der Pflanzenbedeckungsgrads wurde erhöht und der anthropogene Wärmeeintrag um 40% reduziert.

Das Referenzszenario sowie die vorgenommenen Änderungen für beide Szenarios, übertragen auf das 2.8 km-Rechengitter, sind in Abb. 5.1 dargestellt.

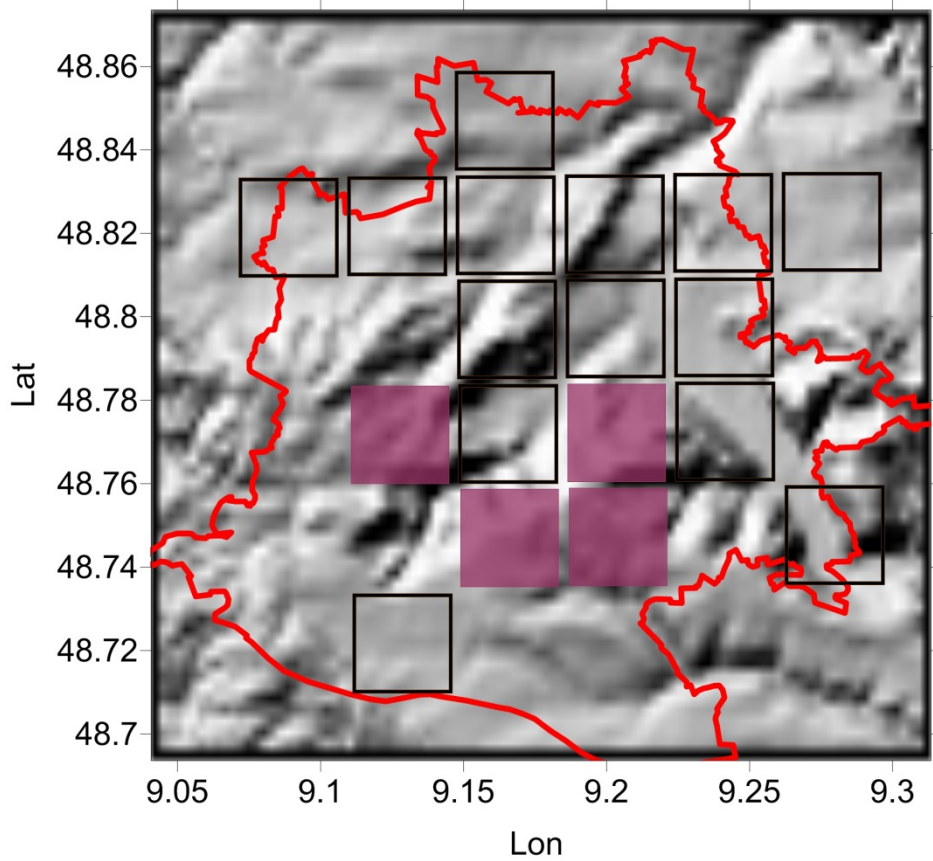


Abb. 5.1: Urbane Landnutzung auf dem 2.8 km-Gitter. Offene Quadrate: Istzustandsbebauung (Referenz), gefüllte Quadrate: zusätzliche Bebauung im Worst Case-Szenario. Bebauung Best Case-Szenario (BCS, nur 2021-2025 gerechnet) wie Referenz.

6 Stand alone-Simulationen mit Veg3d

Um die in Veg3d implementierten Änderungen zu testen, wurde eine Reihe von Stand alone-Simulationen, d.h. Simulationen, bei denen das Modell mit externen Atmosphärendaten angetrieben wird, ohne auf die Atmosphäre zurückzuwirken, durchgeführt.

6.1 Test des anthropogenen Wärmeeintrags

Hierfür wurde eine Simulation für das Jahr 1984 mit einer Gitterauflösung von 1 km für den Stuttgarter Raum durchgeführt. Abb. 6.1 zeigt die Wochenmittel der Bodentemperatur für die Landnutzungsklassen LCZ 2 (a und b) und LCZ 10 (c und d) und für das gesamte Gebiet (e und f). Links ist jeweils das Schichtmittel über die oberen 4 Bodenschichten (Tiefe 0 bis 0.28 m (Tiefe 0 bis 0.28

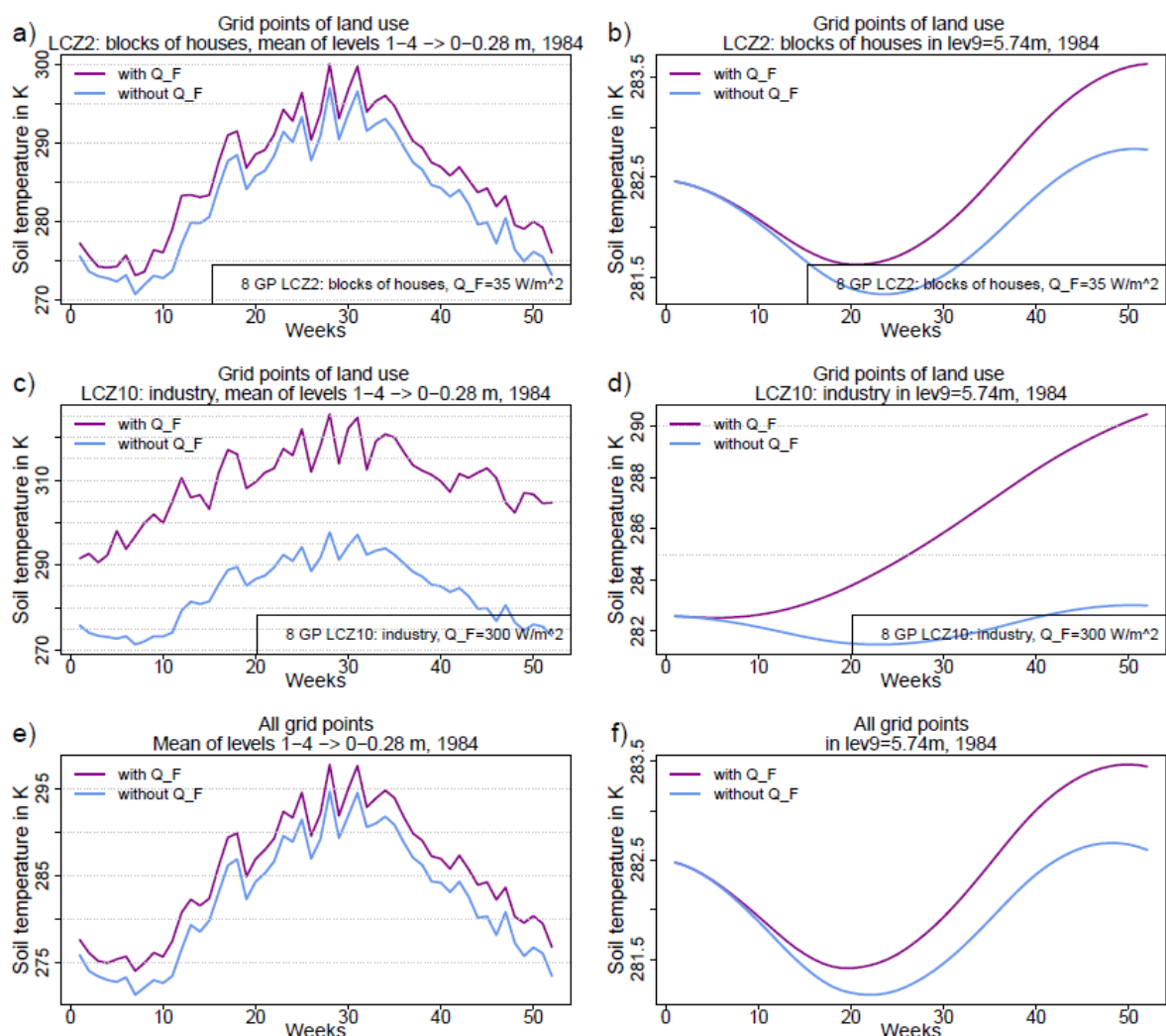


Abb. 6.1: Wochenmittel der Bodentemperatur für die Landnutzungsklassen LCZ 2 (a und b) und LCZ 10 (c und d) und für das gesamte Gebiet (e und f). Details siehe Text.

m) und rechts die Werte in der zweituntersten Bodenschicht in einer Tiefe von etwa 6 m gezeigt. In Lila sind die Ergebnisse mit anthropogenem Wärmeeintrag, in blau diejenigen

ohne anthropogenem Wärmeeintrag dargestellt. LCZ 10 mit seinem sehr hohen anthropogenen Wärmeeintrag wurde nur zu Testzwecken verwendet.

Erwartungsgemäß bewirken die Simulationen mit anthropogenem Wärmeeintrag eine Temperaturerhöhung sowohl in den oberen als auch den tiefen Bodenschichten, welche bei LCZ 10 am größten ist. Die Ergebnisse für LCZ 2 und das gesamte Gebiet sind einander sehr ähnlich. Insgesamt ergeben sich realistisch erscheinende Temperaturerhöhungen von etwa 3 K in den oberen und etwa 1 K in der unteren Bodenschicht. Realistisch ist auch, dass sich in der unteren Bodenschicht die Temperaturerhöhung erst mit einer Zeitverzögerung von etwa einem Jahr einstellt; ein solcher Wert ergibt sich auch aus theoretischen Überlegungen. Insgesamt zeigt sich, dass der anthropogene Wärmeeintrag erfolgreich in das Modell implementiert worden ist.

6.2 Zyklisches Spin-up

Die Ergebnisse aus Abschnitt 6.1 zeigen, dass der Boden nach der Initialisierung je nach Tiefe eine Einschwingzeit von einigen Monaten bis Jahren benötigt, um ein neues Gleichgewicht zu erreichen. Dem wurde bei den Simulationen dadurch Rechnung getragen, dass Veg3d über mehrere Jahre (in diesem Fall vier) zyklisch mit einem Jahresgang von Atmosphärendaten angetrieben wurde. Wie Abb. 6.2 zeigt, konnte dadurch Konvergenz in den oberen Bodenschichten erreicht werden, während dies in der tiefen Schicht nach vier Jahren noch nicht ganz der Fall ist. Hier wären mehr Zyklen erforderlich, was aber aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden konnte.

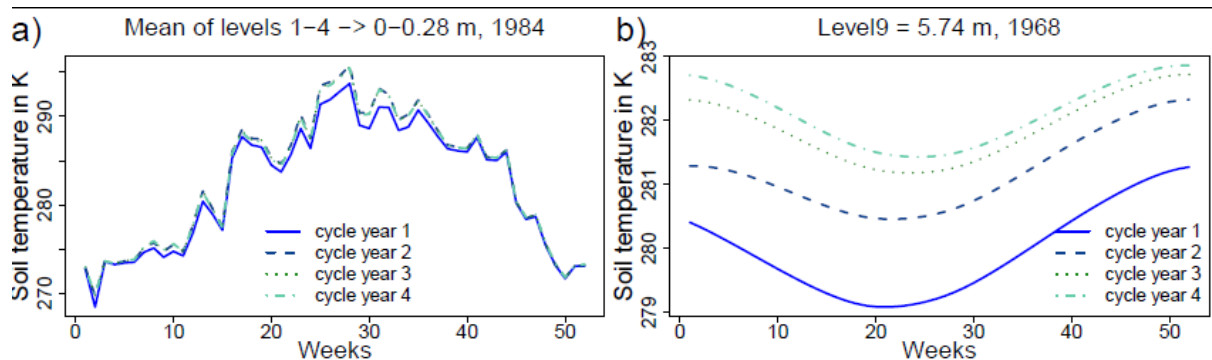


Abb. 6.2: Wochenmittel der flächengemittelten Bodentemperatur nach verschiedenen Zyklen für a) die oberen Bodenschichten und b) in etwa 6 m Tiefe.

7 Validierung mit ERA40-Reanalysen

Eine Validierung von COSMO-CLM-Simulationen mit 2.8 km Auflösung für Süddeutschland ist in Hackenbruch et al. (2016) zu finden. Für eine erste Validierung stadtklimatisch relevanter Größen wie Temperatur, Feuchte, Niederschlag und Strahlung für den Großraum Stuttgart wurde auf diese bereits vorliegenden Simulationen (Standardversion COSMO-CLM+TERRA) mit ERA40-Antrieb und 2.8 km Auflösung für den Zeitraum 1971-2000 zurückgegriffen, worin Verbesserungen durch das geänderte Boden-Vegetationsmodell natürlich nicht enthalten sind. Der Vergleich erfolgte mit dem HYRAS-Datensatz (Rauthe et al. 2013), aggregiert auf 2.8 km Auflösung, mit Klimadaten des DWD, sowie mit Stationsdaten.

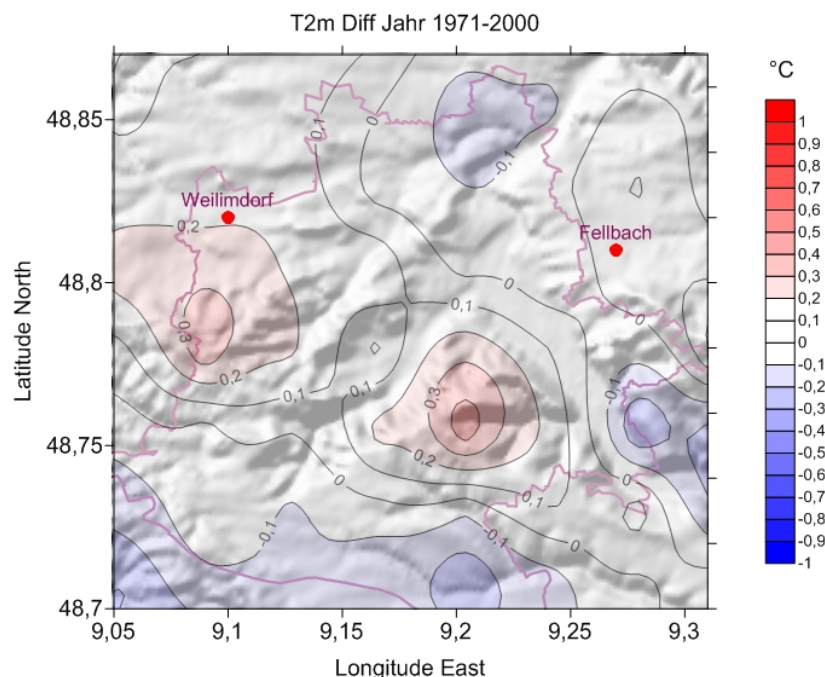


Abb. 7.1: Region Stuttgart mit Differenz der Jahresmitteltemperatur CLM 2.8 km – HYRAS.

Die Ergebnisse dieser Vergleiche werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Temperatur

Insgesamt stimmen die mittleren Jahresmitteltemperaturen in Modell und Beobachtungen (HYRAS) gut überein (s. Abbildung 7.1). Die Jahresmitteltemperaturen im Stadtkreis Stuttgart liegen gemäß Klimaatlas Region Stuttgart

http://www.region-stuttgart.org/fileadmin/regionstuttgart/04_Informationen_und_Download/04_01_Veroeffentlichungen/04_04_04_Klimaatlas/klimaatlas_01-50_grundlagenteil.pdf

zwischen 7 bis 8°C in den höheren Lagen und kleinräumig bis zu 11 bis 12°C direkt am Neckar. Die auf 2.8 km interpolierten HYRAS-Beobachtungsdaten zeigen Werte von etwa 7.8°C ganz im Südwesten des Stadtkreises und um 10°C im Nordosten. Die Differenzen Modell minus Beobachtungen liegen zwischen etwa +0.5 und -1 K. Die Temperaturen werden im Winterhalbjahr dabei eher zu niedrig, im Sommerhalbjahr eher zu hoch wiedergegeben.

Heiße Tage

Das Modell berechnet mit 1 bis 5,5 Tagen pro Jahr zu wenige heiße Tage, wobei die Abweichungen räumlich stark variieren, wie der Vergleich zweier Stationen zeigt (Abb. 7.2). Die räumliche Struktur folgt der Topographie und zeigt ähnlich den Beobachtungen einen Anstieg der heißen Tage von Südwesten zum Neckartal hin.

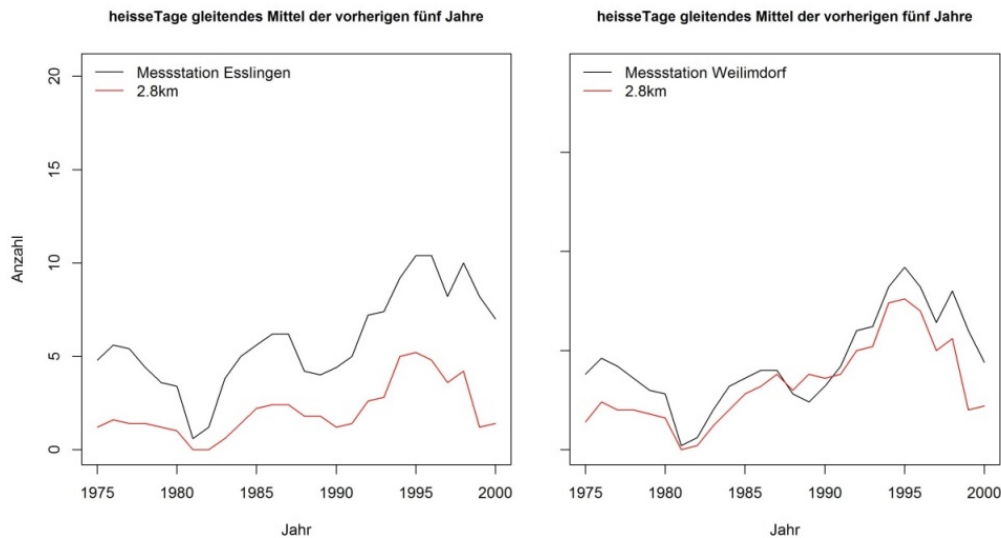


Abb. 7.2: Vergleich der Anzahl der heißen Tage an den Gitterboxen Esslingen und Weilimdorf mit den entsprechenden Stationsdaten.

Frosttage

Die Modellergebnisse liegen mit 50 bis 80 Frosttagen pro Jahr im Bereich der DWD-Daten. Sie zeigen eine Zunahme von Nordosten nach Südwesten (nicht gezeigt). Die räumliche Struktur folgt ebenfalls der Topographie und zeigt daher eine Abnahme der Frosttage von Südwesten zum Neckartal hin.

Niederschlag

Die mittlere Jahressumme des Niederschlags in der Region Stuttgart wird im Modell überschätzt. Die Modellergebnisse liegen dabei bis zu 450 mm über den Beobachtungsdaten, bei beobachteten mittleren Jahressummen um 700 bis 950 mm. Die Überschätzung ist im Winterhalbjahr höher als im Sommerhalbjahr.

Relative Feuchte

Die relative Feuchte wird vom Modell gut simuliert, vor allem im Sommer zeigen Modell und Beobachtungen eine sehr gute Übereinstimmung, meist mit Differenzen kleiner als 2 % relativer Feuchte. Im Winter wird die relative Feuchte leicht überschätzt.

Globalstrahlung

Die Globalstrahlung wird im Modell gegenüber den Beobachtungen (DWD-Rasterdaten) leicht unterschätzt, um bis zu 200 kWh/m² in den mittleren Jahressummen. Diese liegen bei bis zu etwa 1100 kWh/m² im Modell und bei 1150 kWh/m² in den Beobachtungen.

Wind

In 2,8 km-Auflösung werden kleinräumige, aber wegen ihrer Persistenz klimarelevante Windsysteme besser erfasst. So sind in den Windrosen der Nachtstunden im Bereich des Neckartales entsprechend dem Talverlauf deutliche räumliche Unterschiede zu erkennen. Die Hauptwindrichtung in den Nachtstunden in der Südhälfte des Gebietes ist Südsüdwest, in der Nordhälfte West. Im Zentrum des Neckartales verändert sich in den Transsekten von Ost nach West die Hauptwindrichtung in den Nachtstunden von Südsüdwest zum Teil bis nach Südsüdost und im weiteren Verlauf über Süd wieder nach Südsüdwest. Zudem treten in der Talmitte viel häufiger sehr geringe Windgeschwindigkeiten auf als in den höheren Lagen. In 7 km-Auflösung hingegen sind jeweils die drei Windrosen von Ost nach West in einer geographischen Breite sehr ähnlich zueinander. In den Tagstunden finden sich im Neckartal keine ausgeprägten Besonderheiten, weder in 2,8 km-Auflösung noch in 7 km-Auflösung.

Fazit

Insgesamt lässt sich feststellen, dass durch die erhöhte Auflösung die räumlichen landnutzungs- und orographiebeeinflussten Strukturen besser erfasst werden und dadurch Temperatur, Niederschlag, Feuchte und Strahlung zum Teil deutlich näher an den Beobachtungen liegen als Simulationen mit gröberer Auflösung. Dies gilt vor allem im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) und wird z.B. deutlich an der wesentlich besseren Wiedergabe des Niederschlagstagesgangs zu dieser Zeit.

8 Läufe mit dem gekoppelten Modellsystem CLM-Veg3d

8.1 Allgemeine Bemerkungen zu den Simulationen

Die hier vorgestellten Ergebnisse sind die Ergebnisse eines einzigen Satzes von Kontroll- und Projektionssimulationen (ECHAM 6, Realisierung 1). Sie geben eine erste Orientierung; um jedoch belastbarere Ergebnisse zu erhalten, wäre die Durchführung und statistische Auswertung von Ensemblesimulationen über einen längeren Zeitraum notwendig.

Es interessiert vor allem die Identifikation des Änderungssignals zwischen dem Kontrollzeitraum und den Bebauungsszenarios des Zukunftszeitraums. Dies wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

8.2 Kontrollzeitraum Gesamtgebiet: Vergleich mit Beobachtungen

Zur Beurteilung der Güte der Simulationen werden in diesem Abschnitt die Jahresmittel der 2m-Temperatur (Abb. 8.1) sowie die Niederschlagssummen (Abb. 8.2) mit den HYRAS-Beobachtungsdaten (Rauthe et al., 2000)

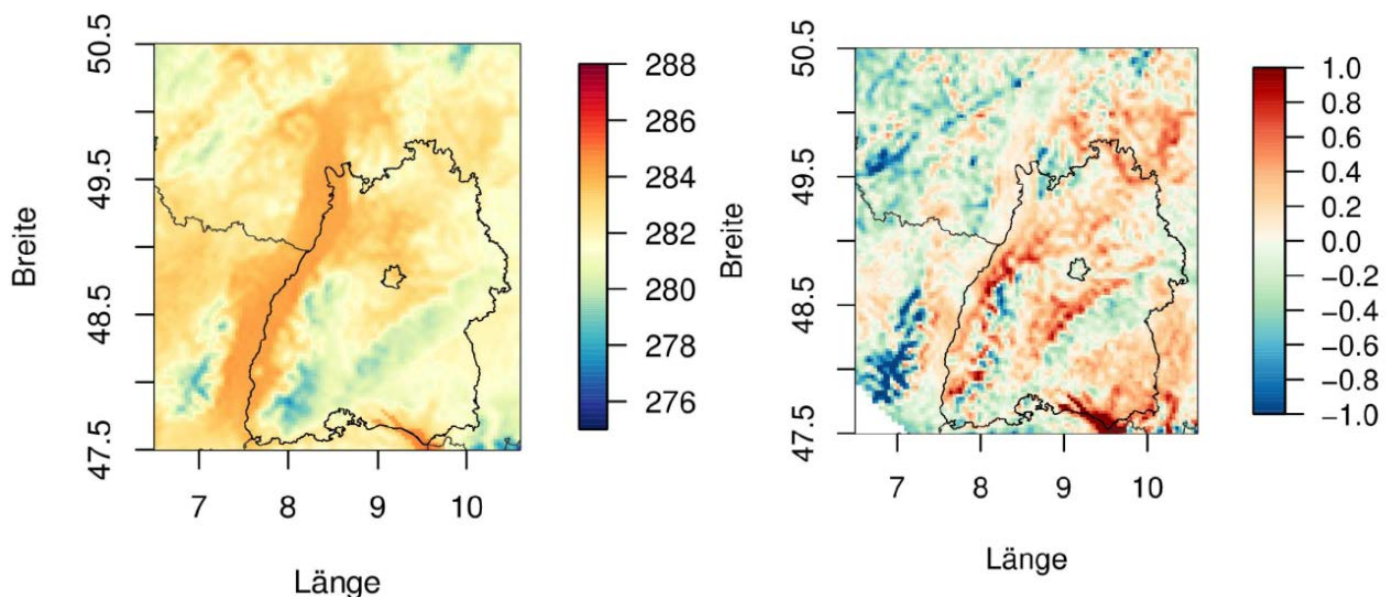


Abb. 8.1: Mittel der 2m-Temperatur 1981-2006. links Kontrolllauf, rechts Differenz Kontroll-HYRAS.

Verglichen; der Vergleich umfasst nur den Zeitraum 1981-2006, da die HYRAS-Daten nur bis 2006 vorliegen. Größere Abweichungen treten in Bereichen größerer Geländeneigung (Schwarzwald, Schwäbische Alb, Vogesen) auf. Im Raum Stuttgart liegt der Fehler im Bereich von ± 0.1 °C.

Der Niederschlag wird in tieferen Lagen des Gesamtgebiets leicht (etwa 100 mm) unter- bzw. überschätzt. Größere Abweichungen treten in höheren Lagen wie im Bereich des Schwarzwalds, der Schwäbischen Alb und der Voralpen auf. Hier besteht weiterer Untersuchungsbedarf.

Da in dieser Arbeit jedoch vor allem das Stadtgebiet Stuttgart interessiert, wo die Fehler moderat sind, sollten diese Abweichungen bei der Interpretation nur eine untergeordnete Rolle spielen.

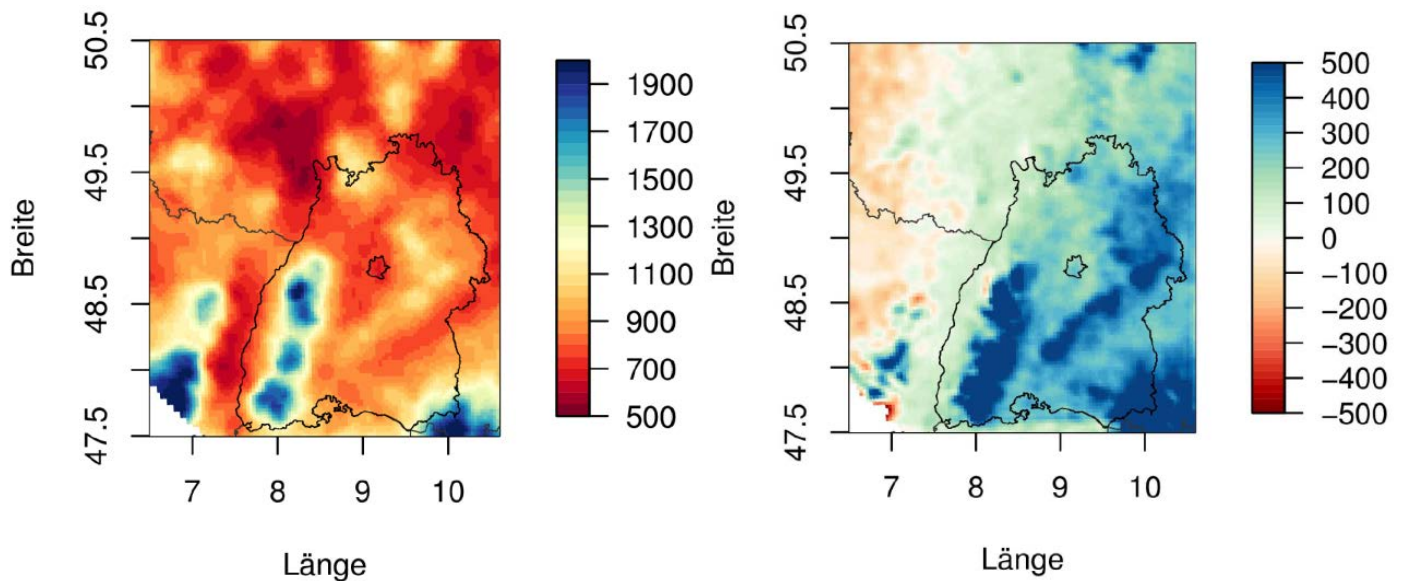


Abb. 8.2: Niederschlagssummen 1981-2006. links Kontrolllauf, rechts Differenz Kontroll-HYRAS.

Als Fazit läßt sich Folgendes festhalten:

- Im Vergleich mit den ERA-angetriebenen Simulationen zeigen die mit ECHAM6 angetriebenen Simulationen stärkere Abweichungen von den HYRAS-Daten, welche im Bereich von etwa ± 1 K liegen. Eine Unterschätzung der Temperatur zeigt sich bereits in den ECHAM-Antriebsdaten selbst, welche die Temperatur im Mittel um etwa 0.3 K unterschätzen. Diese Unterschätzung „vererbt“ sich auf die Regionalsimulationen, wie sich in den folgenden Abschnitten herausstellen wird.
- Im Vergleich mit den ERA-angetriebenen Simulationen zeigen die mit ECHAM6 angetriebenen Simulationen eine deutliche Überschätzung des Niederschlags vor allen in höher gelegenen Regionen Baden-Württembergs. Eine Überschätzung des Niederschlags zeigt sich bereits in den ECHAM-Antriebsdaten selbst, welche den Niederschlag im Mittel um etwa 170 mm überschätzen. Diese Überschätzung „vererbt“ sich ebenfalls auf die Regionalsimulationen.

Auf das Änderungssignal von Mittelwerten hat dies nach unseren bisherigen Erfahrungen wenig Einfluß. Änderungen von ± 0.2 K bzw. ± 20 mm können als geringfügig betrachtet werden.

Größen, die über Schwellenwerte abgeleitet werden (z.B. Sommertage und Häufigkeit von Starkniederschlägen) werden im vorliegenden Fall unter- (Sommertage) bzw. überschätzt (Tage mit Starkniederschlag). Wir gehen davon aus, dass das Änderungssignal solcher Größen weniger stark von Über- oder Unterschätzungen beeinflusst wird als die Größen selbst, so dass die dargestellten Ergebnisse die künftige Entwicklung im Großen und Ganzen richtig wiedergeben und Änderungen von ± 1 Tag geringfügig sind.

8.3 Projektionszeitraum mit Istzustands(Referenz-)bebauung

Die folgenden Auswertungen beziehen sich auf das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober), da dann die stärksten negativen Auswirkungen auf das Stadtklima (Wärmebelastung, Schwüle) zu erwarten sind. In Winterhalbjahr dagegen ist wegen der Temperaturzunahme keine Verschlechterung des Stadtklimas zu erwarten.

Den folgenden Darstellungen ist die Orographie als Relief zur Orientierung unterlegt. Die Bebauung ist mit Quadraten markiert. Es sind jeweils der Kontrollzeitraum und die Differenz zwischen beiden (Projektion-Kontroll) dargestellt.

Wie zu erwarten, nimmt die *mittlere Sommertemperatur* mit der Höhe ab, so dass die Temperaturen im Südwesten des Auswertebiets am niedrigsten und im Bereich des Neckartals am höchsten sind (Abb. 8.3 links). Die Temperaturdifferenzen zwischen Projektionszeitraum und Kontrollzeitraum zeigen eine geringe Variation und liegen um etwa 0.74 ± 0.03 K (Abb. 8.3 rechts). Zum Vergleich: zwischen 1931 und 2010 nahm die beobachtete Temperatur um etwa 1 K zu. Die Temperaturzunahme ist am höchsten im südöstlichen Bereich, eine Korrelation der Temperaturzunahme mit der Bebauungsdichte ist nicht erkennbar.

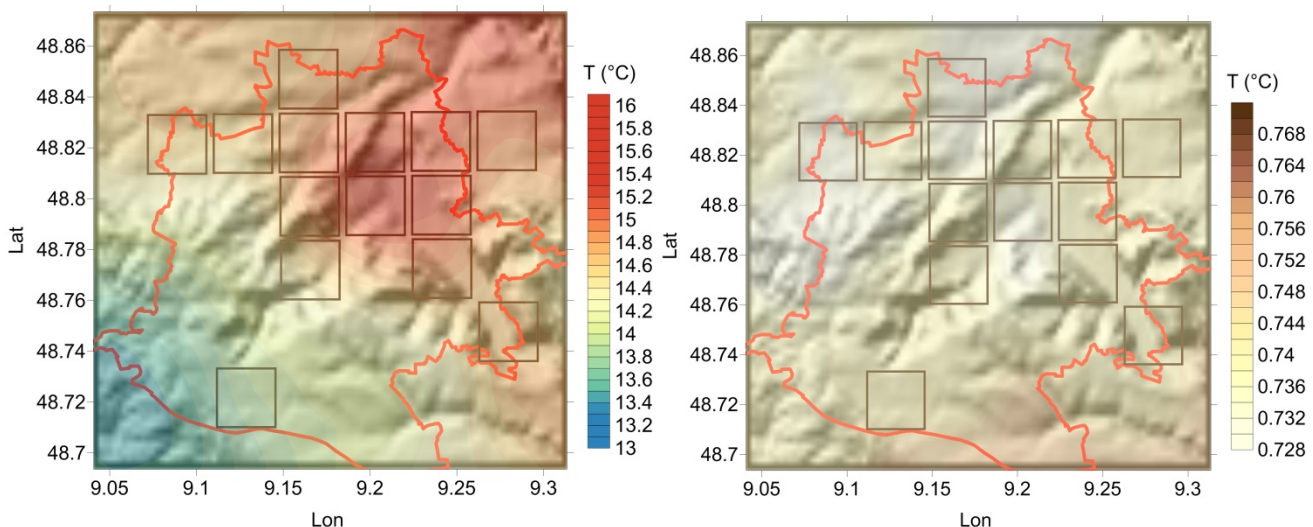


Abb. 8.3: Sommertemperaturen (in °C): links Kontrolllauf 1981-2010, rechts Differenz Projektion-Kontrollzeitraum.

Die *Anzahl der Sommertage* (Abb. 8.4) nimmt um etwa drei bis sechs (im Mittel 5) Tage zu, wobei die größte Zunahme im Stadtgebiet und im südöstlichen Bereich stattfindet. Eine direkte Korrelation mit der Bebauung ist nicht zu erkennen, wohl aber ist die Änderung auf den höher gelegenen Fildern geringer.

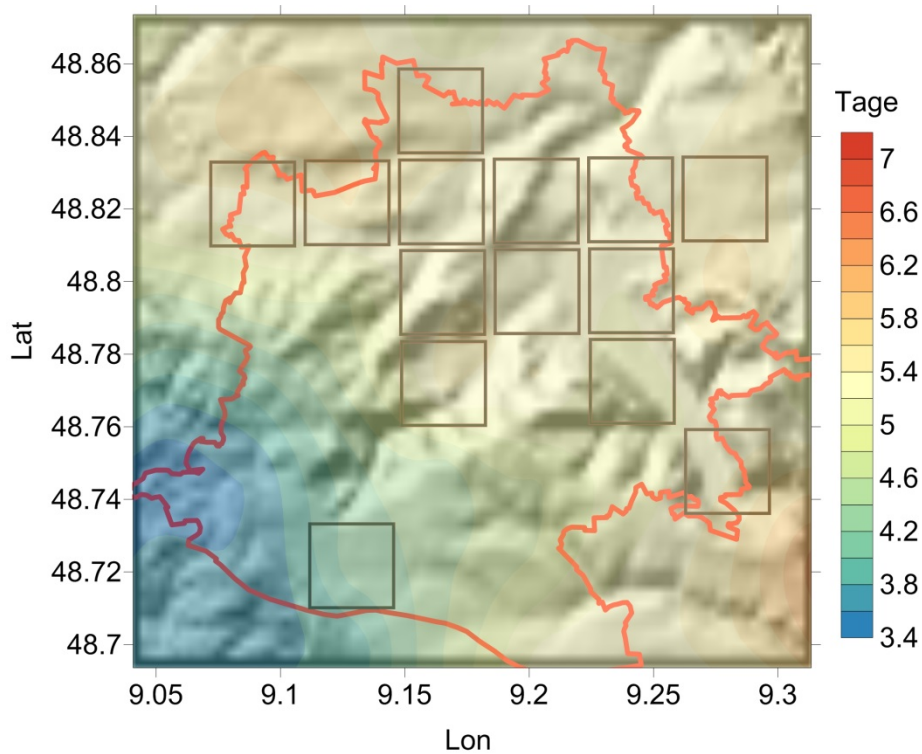


Abb. 8.4: Änderung der Anzahl der Sommertage.

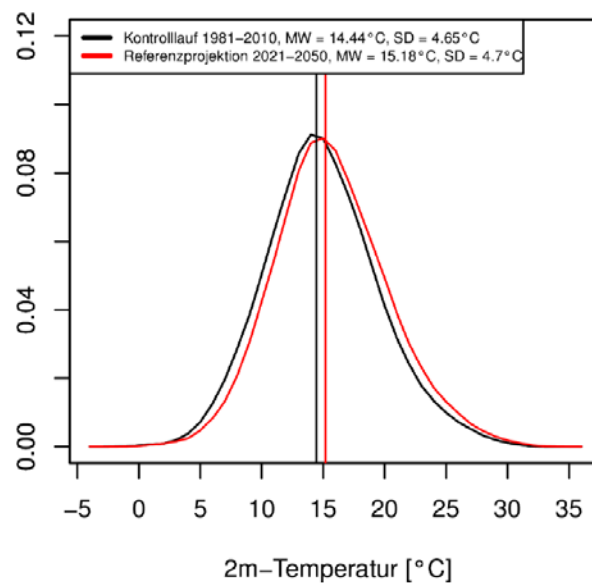


Abb. 8.5: Häufigkeitsverteilung der stündlichen Sommertemperaturen im Kontroll- und im Projektionszeitraum.

Die Änderung in der Häufigkeitsverteilung der 2m-Temperatur im Stadtgebiet Stuttgart zeigt Abb. 8.5. Der Mittelwert erhöht sich, wie bereits oben gesagt, um etwa 0.7 K, die Breite der Verteilung erhöht sich geringfügig um weniger als 0.1 K, was die Erhöhung der Anzahl der Sommertage erklärt.

Der *Sommerniederschlag* zeigt im Zukunftszeitraum neben geringfügigen Abnahmen überwiegend leichte Zunahmen und ist damit unwesentlich (Mittel 12 mm) höher als im Kontrollzeitraum (Abb. 8.6) mit einer Maximalzunahme von etwa 40 mm. Allerdings sind

diese Unterschiede prozentual gering. Es kann daher nur von einer leichten Tendenz zu höheren Niederschlägen gesprochen werden, welche auch nicht mit der Bebauung korreliert werden kann. Die Zunahme findet vor allem in höheren Lagen statt, während im Bereich des Neckartals keine nennenswerten Änderungen auftreten.

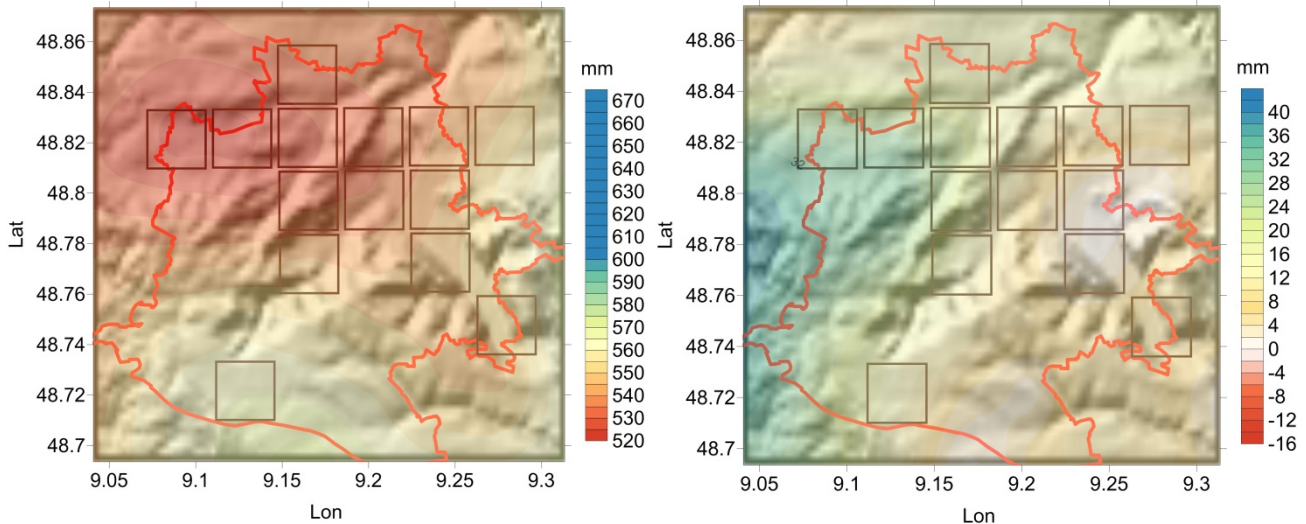


Abb. 8.6: Sommerniederschläge (mm): links Kontrolllauf 1981-2010, rechts Differenz Projektions-Kontrollzeitraum.

Zur Identifikation von *Starkniederschlägen* wurden die Anzahl der Tage berechnet, an denen mindestens 20 mm/Tag Niederschlag fiel (Abb. 8.7). Die Änderung liegt im Bereich eines Tages und ist somit geringfügig mit einer überwiegend leichten Zunahme.

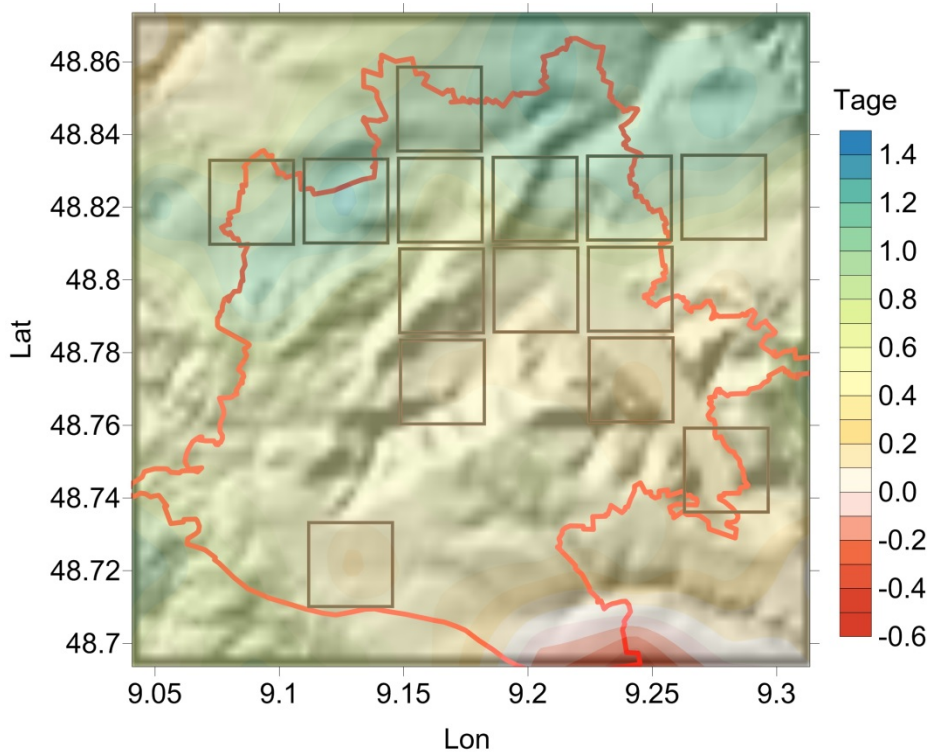


Abb. 8.7: Änderung der Anzahl der Tage mit Starkniederschlag zwischen Kontrollzeitraum und Projektionszeitraum.

Auch die Häufigkeitsverteilung (Abb. 8.8) des Niederschlags zeigt eine Zunahme der Starkniederschläge, welche jedoch insbesondere bei höheren Werten wegen der geringen Zahl der Ereignisse statistisch nicht belastbar ist.

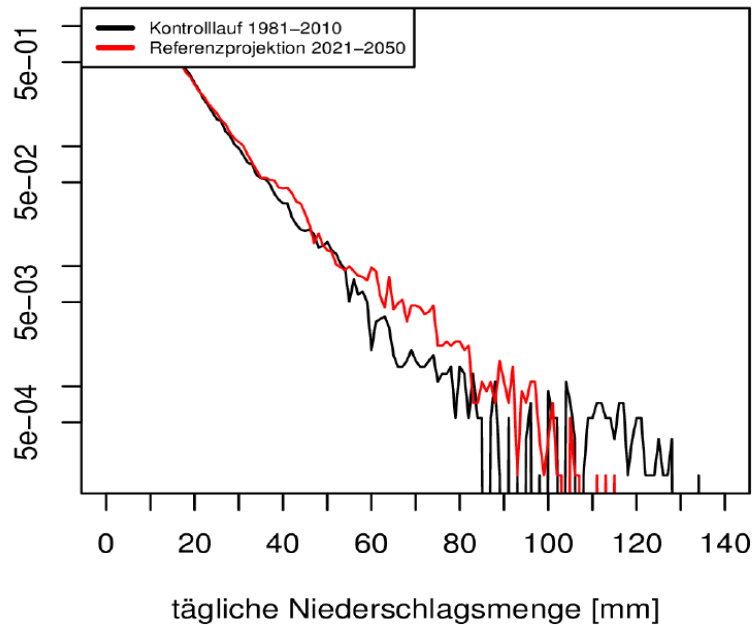


Abb. 8.8: Häufigkeitsverteilung (gesamtes Stadtgebiet) der täglichen Sommerniederschläge im Kontroll- und im Projektionszeitraum.

Die Häufigkeitsverteilung der *Windrichtung* in 10 Höhe (Sommer-Tageswerte 08:00-19:00 Uhr, Abb. 8.9) im Stadtgebiet zeigt zwei Maxima: die großskalige Hauptwindrichtung sowie die Kanalisierung durch das Neckartal. Eine Änderung der Verteilung ist nicht zu erkennen.

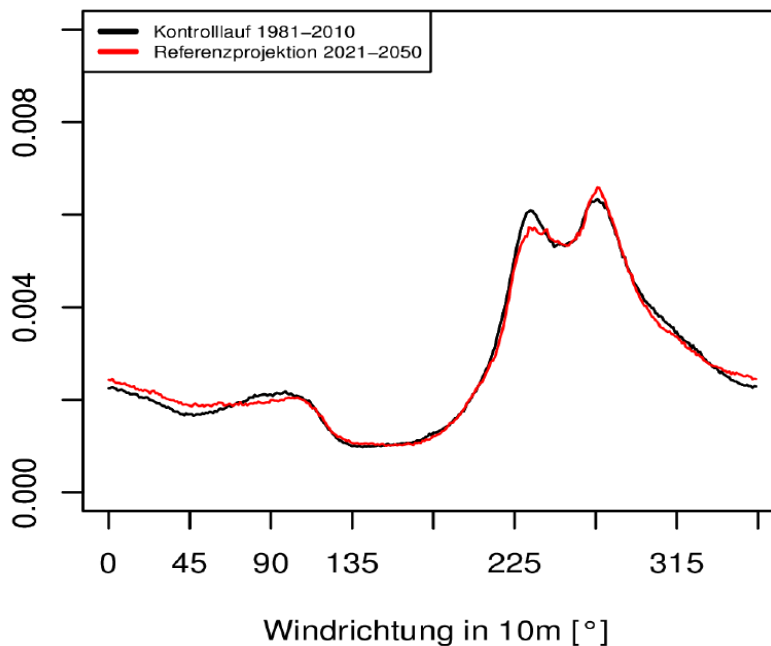


Abb. 8.9: Häufigkeitsverteilung (gesamtes Stadtgebiet) der Windrichtung (Tagwerte 08:00-19:00) im Kontroll- und im Projektionszeitraum.

Globalstrahlung, Bewölkung und spezifische Feuchte

Im Vergleich zum Kontrollzeitraum reduziert sich die Globalstrahlung geringfügig und räumlich ziemlich homogen im Mittel um 36 kWh/m^2 (Abb. 8.10), während Bedeckungsgrad und Feuchte praktisch konstant bleiben (Änderungen im 0.5%-Bereich); letztere werden deswegen hier nicht dargestellt.

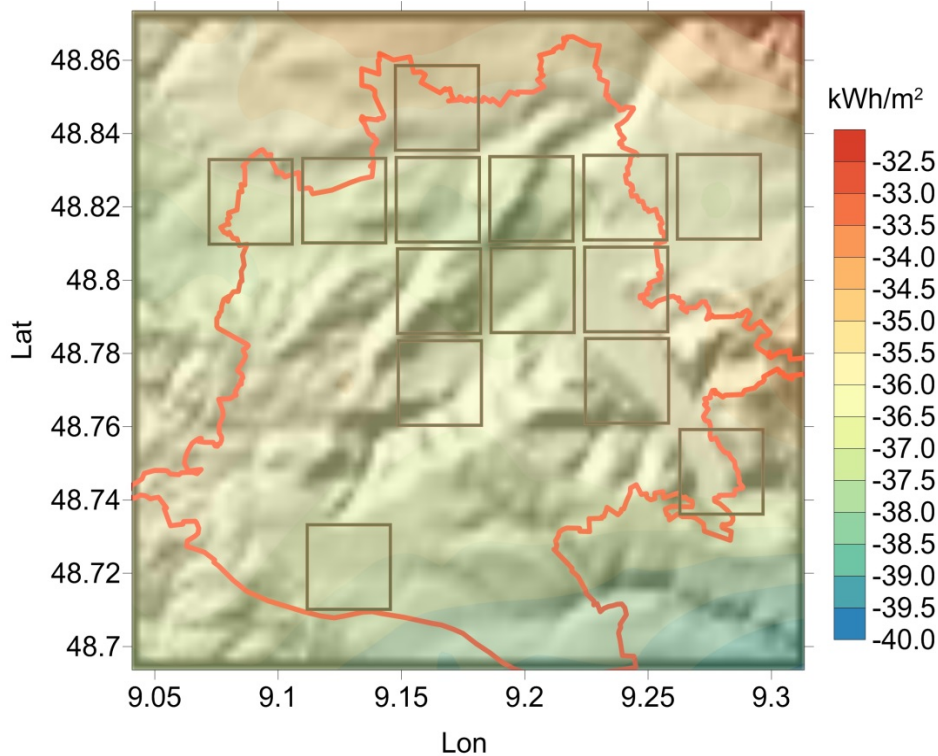


Abb. 8.10: Änderung der Globalstrahlung zwischen Kontrollzeitraum und Projektionszeitraum.

Zusammenfassung

Die mittlere 2m-Temperatur nimmt im Sommer um etwa 0.74 K zu. Die mittlere Anzahl der Sommertage nimmt entsprechend ebenfalls um 3 bis 6 Tage zu. Neben stellenweise leichten Abnahmen nimmt die Sommerniederschlagssumme leicht um bis zu 40 mm (im Mittel 12 mm) zu. Die Anzahl der Tage mit Starkniederschlag ändert sich praktisch nicht. Auch bei der Windrichtung ist keine Änderung zu beobachten. Globalstrahlung, Bewölkung und spezifische Feuchte ändern sich ebenfalls praktisch nicht.

8.4 Zukunftszeitraum mit Bebauungsverdichtung (Worst Case Szenario WCS)

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der gekoppelten Simulationen für das WCS im Zukunftszeitraum denen der Referenzprojektion gegenübergestellt. Im WCS werden mehr Gitterboxen städtischer Landnutzung zugeordnet und die Bebauung in bebauten Gitterboxen teilweise verdichtet. Diese Gitterboxen werden als „intensivierte Gitterboxen“ bezeichnet und sind in den folgenden Abbildungen schattiert. Es werden im Folgenden nur die Differenzbilder zwischen worst case Projektion und Referenzprojektion gezeigt. Die Diskussion bezieht sich auf das Sommerhalbjahr.

Die Differenz der *mittleren Sommertemperatur* zwischen dem worst case szenario (WCS) und der Referenz-Projektion zeigt Abb. 8.11. Die Temperaturdifferenzen sind gering; Zunahmen treten auch, aber nicht nur, an intensivierten Gitterboxen auf. Die Abnahmen sind als nicht signifikant zu betrachten. Eine deutlichere Korrelation mit der Bebauungsintensivierung zeigt die Differenz der *Anzahl der Sommertage* (Abb. 8.12). Nur im Bereich der intensivierten Bebauung nimmt die Anzahl der Sommertage deutlich um bis zu drei Tage zu.

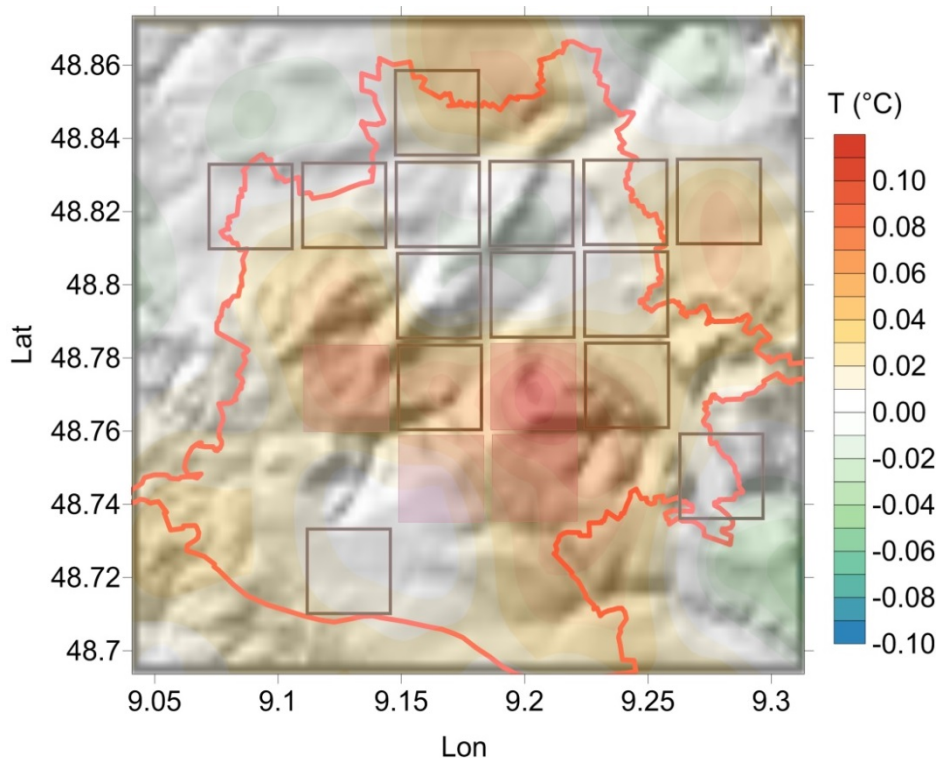


Abb. 8.11: Mittlere Sommertemperatur: Differenz zwischen WCS und Referenzprojektion.

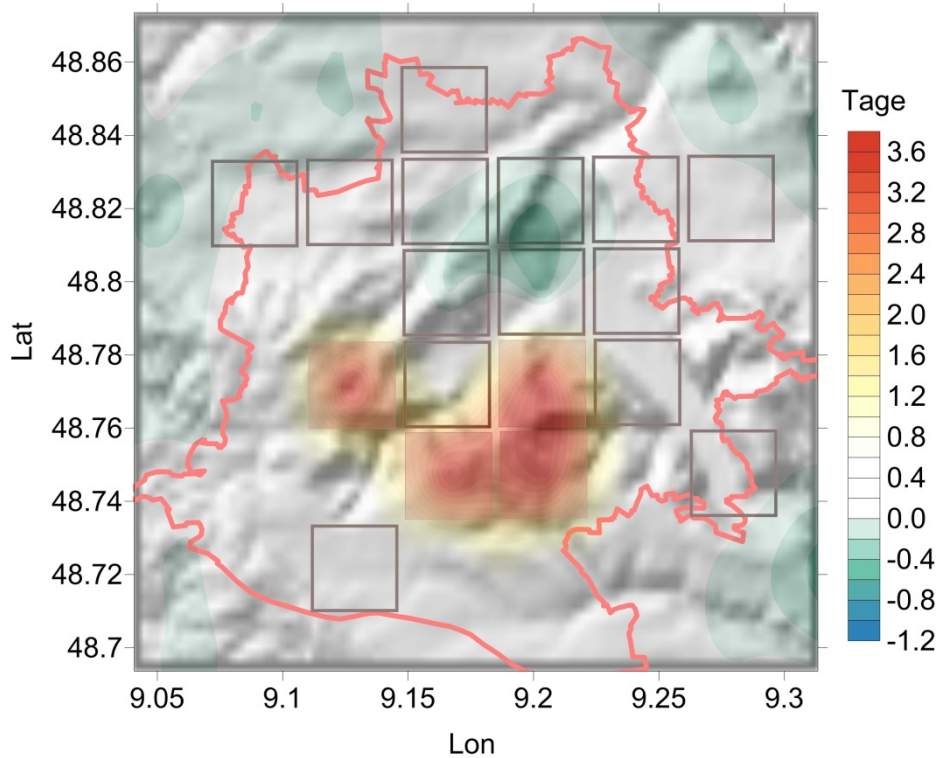


Abb. 8.12: Anzahl der Sommertage: Differenz zwischen WCS und Referenzprojektion.

Die Niederschlagssummen nehmen im Sommerhalbjahr (Abb. 8.13) geringfügig ab, wobei kein Zusammenhang mit Bereichen mit intensivierter Bebauung auf zu erkennen ist.

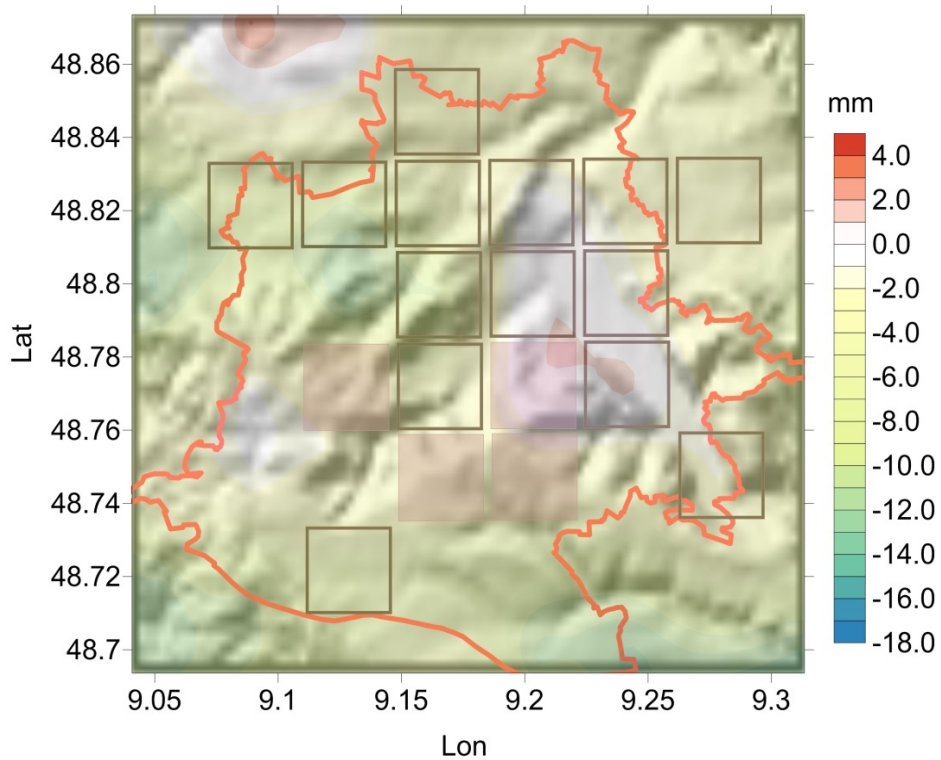


Abb. 8.13: Sommer-Niederschlagssumme: Differenz zwischen WCS und Referenzprojektion.

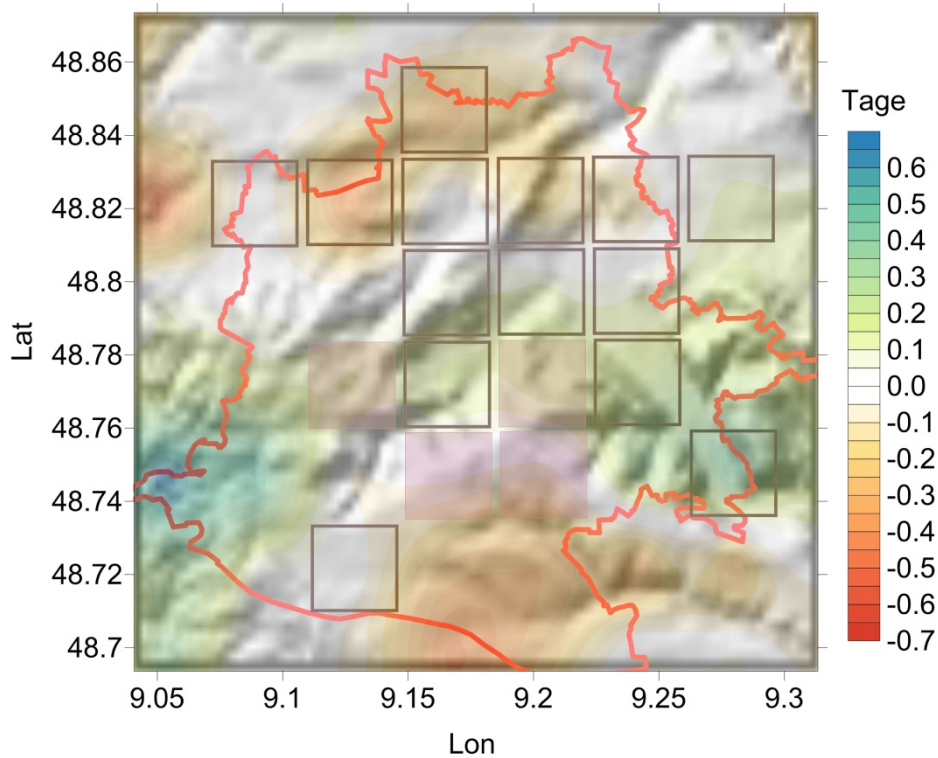


Abb. 8.14: Anzahl der Tage mit Starkniederschlag.

Ebenso geringfügig ist die Änderung der Anzahl der Tage mit Starkniederschlag, welche im Bereich von ± 1 Tag liegt.

Die Abnahme der Globalstrahlung zwischen WCS und Referenz ist ebenfalls gering und beträgt maximal 10 kWh/m^2 . Ebenso geringfügig sind die Differenzen in Bewölkung und Feuchte.

Insgesamt treten zwischen WCS und Referenzprojektion außer der Zunahme der Anzahl der Sommertage keine signifikanten Differenzen auf.

8.5 Vergleich 5-Jahreszeitraum mit 30-Jahreszeitraum

Wie bereits erwähnt, wurde aus Zeitgründen das ‚Best Case‘-Szenario nur für den Zeitraum 2021-2025 gerechnet und mit dem (früheren) Kontrollzeitraum 1971-1975 verglichen. Es ist daher interessant zu wissen, ob eine Übertragung der Änderungssignale für kürzere Zeiträume auf längere möglich ist. Hierzu werden im Folgenden für die Zeiträume 1981-2010 und 2021-2050 die Sommerhalbjahrtemperaturen, gemittelt über 30 Jahre mit den Mittelwerten über 5 Jahre verglichen.

Das 30-Jahresmittel der Änderung liegt bei etwa 1 °C, während die 5-Jahresmittel der Änderung im Bereich zwischen etwa 0.5 und 2 °C schwanken (Abb. 8.15) mit einer ausgeprägten Variabilität. Das bedeutet, dass Änderungen einzelner 5-Jahreszeiträume nicht als repräsentativ für die Änderungen des 30-Jahreszeitraums betrachtet werden können. Dies gilt für das gesamte Gebiet Baden-Württemberg (wie in der Abbildung gezeigt) ebenso wie für das Stadtgebiet Stuttgart.

In einem nächsten Schritt wurden die 30-Jahresmittel des Zukunftszeitraums 2021-2050 mit Referenzbebauung einerseits und mit ‚Worst Case‘-Bebauung andererseits mit den entsprechenden 5-Jahresmitteln verglichen; dies ist in Abb. 8.16 für das Stadtgebiet von Stuttgart gezeigt. Der Vergleich mit Abb. 8.15 zeigt, dass die Änderungen der Mitteltemperatur im Stadtgebiet Stuttgart, die auf Bauungsänderungen zurückzuführen sind, im Vergleich zum Klimaänderungssignal deutlich geringer sind; sie liegen im Bereich von etwa 0.2 °C. Wichtig ist die geringe Jahr-zu-Jahr-Variabilität, was bedeutet, dass Unterschiede über 5 Jahre gemittelt als repräsentativ für Unterschiede, die über längere Zeiträume gemittelt wurden, betrachtet werden können. Die hier für die Temperatur beschriebenen Ergebnisse gelten auch für den Niederschlag.

Damit kann als Fazit festgehalten werden:

- Wegen der großen Jahr-zu-Jahr-Variabilität reichen 5-Jahreszeiträume für Aussagen zum Klimawandel im vorliegenden Fall nicht aus.
- Dagegen zeigt die Änderung bei verschiedenen Bauungen keine wesentliche Variabilität. Um den Einfluss von Bauungsänderungen auf das Klima zu quantifizieren, reichen offenbar kürzere Zeiträume aus.

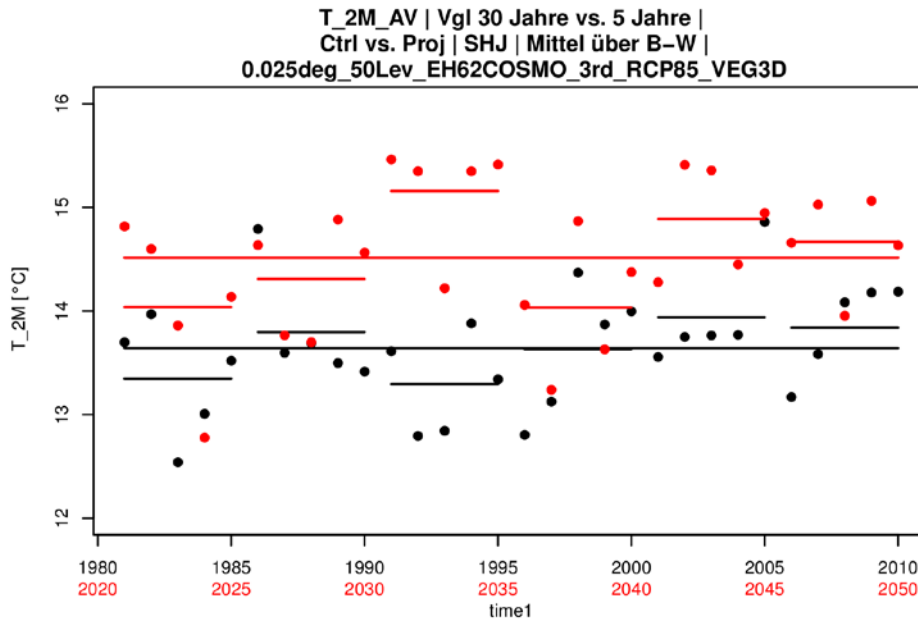


Abb. 8.15: Änderungssignal T2m Mittel BW. Bebauung Istzustand. (=Änderung durch großskaligen Klimawandel)

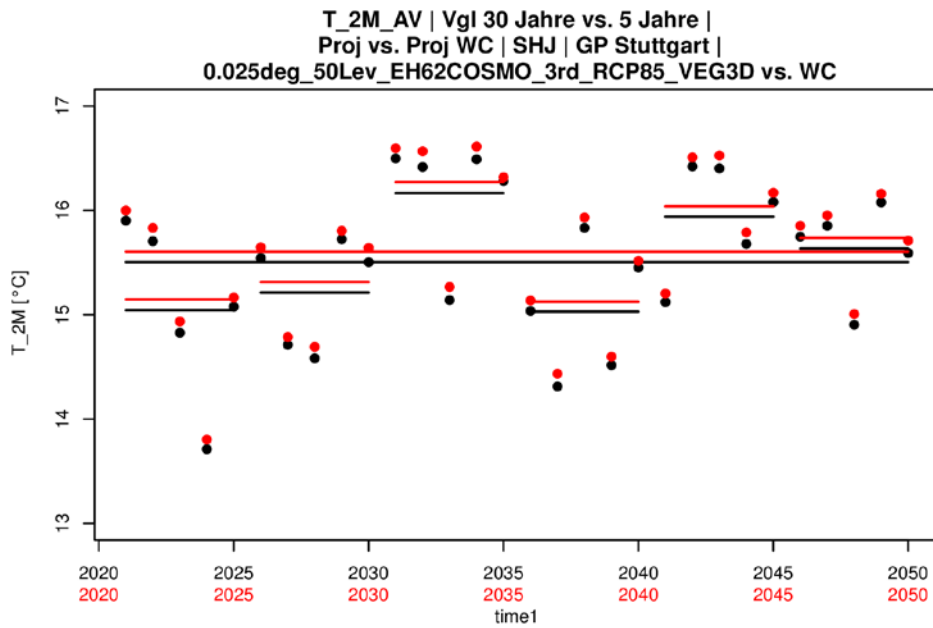


Abb. 8.16: Änderungssignal T2m durch Bebauung ‚Worst case‘ minus Istzustand im Stadtgebiet Stuttgart

8.6 Zukunftszeitraum mit nachhaltiger Bebauung (Best Case Szenario BCS)

In diesem Abschnitt werden der Vollständigkeit halber die Ergebnisse der gekoppelten Simulationen für das BCS im Projektionszeitraum 2021-2025 denen der Referenzprojektion 1971-1975 gegenübergestellt. Wie im vorigen Abschnitt dargelegt, kann der Einfluß der Bebauung auf die Klimaänderung näherungsweise anhand von 5 Jahres-Zeiträumen festgestellt werden. Im BCS wurden acht Gitterboxen im Süden von Landwirtschaft auf Wald geändert; ferner wurde der anthropogene Wärmeeintrag der urbanen Boxen um 40% reduziert und der Anteil bewachsener Flächen bei urbanen Boxen um 10% erhöht. Wie im vorigen Abschnitt bezieht sich die Diskussion auf das Sommerhalbjahr.

Die *mittlere Sommertemperatur* reduziert sich im BCS gegenüber der Referenz geringfügig um etwa 0.15 K. Aufforsten hat eine ähnliche Wirkung wie die Auflockerung der Bebauung. Alle Änderungen sind klein und nicht signifikant. Ebenso geringfügig ist die Differenz der *Anzahl der Sommertage*, welche weniger als einen Tag beträgt.

Gering ist auch die Differenz der *Niederschlagsmenge* und der *Anzahl der Tage mit Starkniederschlag*. Die Differenzen sind überwiegend negativ und am größten im Bereich der städtischen Bebauung, aber durchweg geringfügig.

Die *Globalstrahlung* geht im Bereich der Aufforstungen geringfügig zurück, verbunden mit einer leichten Zunahme der Bewölkung. Nur im Bereich der Aufforstung tritt eine leichte Abnahme der *spezifischen Feuchte* auf.

Insgesamt lässt sich für das BCS festhalten, dass die auftretenden Differenzen gering sind. Eine Landnutzungsänderung wirkt sich stärker aus als eine Auflockerung der Bebauung. Alle Änderungen sind wesentlich kleiner als die Änderungen, welche durch den Klimawandel allein bewirkt werden.

9 Gegenüberstellung der Auswirkungen des Klimawandels und der Auswirkungen von Landnutzungsänderungen im Stadtgebiet Stuttgart

In Tabelle 8.1 sind die Änderungen, welche durch den Klimawandel bewirkt werden (Differenz Projektionszeitraum (PR) - Kontrollzeitraum (K) bei Referenzbebauung) denjenigen, welche durch Landnutzungsänderungen (Differenz WCS bzw. BCS gegen Referenzbebauung im Projektionszeitraum) verursacht sind, gegenübergestellt. Die Mittelwerte beziehen sich auf das Stadtgebiet von Stuttgart. Wie bereits erwähnt, bezieht sich der Fall BCS-PR auf die Zeiträume 1971-1975 und 2021-2025.

| Größe | Einheit | K | PR-K | WCS-PR | BCS-PR |
|-------------------------------|--------------------|-------|------|--------|--------|
| 2m-Temperatur | K | 287.5 | 0.7 | 0.01 | -0.1 |
| Anzahl Sommertage | d | 6.4 | 5.1 | 0.2 | -0.2 |
| Niederschlagssumme | mm | 560 | 12 | -6 | -20 |
| Anzahl Tage Starkniederschlag | d | 5 | 0.5 | 0 | -0.3 |
| Summe Globalstrahlung | kWh/m ² | 696 | -36 | 12 | 1 |
| 2m-spezifische Feuchte | g/kg | 7.7 | 0.03 | 0 | 0 |
| Bewölkung | % | 78 | 1.3 | 0 | 0 |

Tabelle 8.1: Änderung (Sommerhalbjahr, teilweise gerundet) der im Text diskutierten Variablen. Referenzprojektion-Kontrolllauf (PR-K), Best Case-Projektion-Referenzprojektion (BCS-PR) und Worst Case-Projektion-Referenzprojektion (WCS-PR).

Zwischen Projektions- und Kontrollzeitraum (also aufgrund des Klimawandels) erhöht sich die mittlere 2m-Temperatur um etwa 0.7 K. Demgegenüber ergeben sich wesentlich kleinere bzw. gar keine Unterschiede jeweils zwischen den beiden Bebauungsszenarios und der Referenzprojektion: keine Änderung bei WCS, Abnahme beim BCS um 0.1 K. Die Anzahl der Sommertage nimmt im Fall PR-K deutlich zu, während keine nennenswerten Änderungen durch die Bebauungsszenarios erkennbar sind. Bei beiden Größen resultiert die größte Änderung aus dem Klimawandel. Interessant ist, dass beim BCS, also durch Begrünung und Auflockerung der Bebauung, zumindest tendenziell ein Reduktion der Wärmebelastung eintritt, welche auf kleineren räumlichen Skalen durchaus ausgeprägter werden kann.

Die sommerliche Niederschlagssumme erhöht sich zwischen Projektions- und Kontrollzeitraum (also aufgrund des Klimawandels) um 12 mm, während sie sowohl im WCS als auch im BCS gegenüber der Referenzprojektion abnimmt (6 bzw. 20 mm). Beim Niederschlag sind sowohl die Änderungen PR-K als auch die Differenzen bei den Szenarios kleiner als 10% und liegen somit im Unsicherheitsbereich von Niederschlagsdaten. Die Anzahl der Tage mit Starkniederschlag ändert sich nicht nennenswert.

Die Globalstrahlung nimmt zwischen Projektions- und Kontrollzeitraum (also aufgrund des Klimawandels) um 36 kWh/m² ab, was beim WCS durch eine Zunahme um 12 kWh/m² teilweise kompensiert wird; BCS hat keine nennenswerten Auswirkungen auf die Globalstrahlung.

Die Änderungen der spezifischen Feuchte sind in allen Fällen unbedeutend. Das Gleiche gilt auch für die Bewölkung.

Als Ergebnis dieser stichprobenartigen Studie lässt sich festhalten, dass der Klimawandel das Stadtklima Stuttgarts auf der Skala von Stadtquartieren, also im Kilometerbereich, stärker beeinflussen wird als Änderungen der Bebauung. Keines der beiden Szenarios ergab auf den betrachteten Skalen im Kilometerbereich nennenswerte Änderungen gegenüber der Referenz.

Lokal- und mikroklimatisch (d.h. auf räumlichen Skalen im Bereich von Metern) können sich durch Bebauungsänderungen allerdings sehr wohl Unterschiede mit deutlichen Auswirkungen z.B. auf Wärmebelastung, Wohnqualität und Gebäudeenergiebedarf ergeben. Abbildung 9.1 versucht, dies zu verdeutlichen: erst im mikroskaligen Bereich, also bei Skalen unter etwa 1 km, überwiegen lokale Einflüsse das großskalige Klimasignal.

Die in der vorliegenden Studie generierten Daten könnten verwendet werden, um hierzu mit Stadtklimamodellen genauere Informationen zu erhalten.

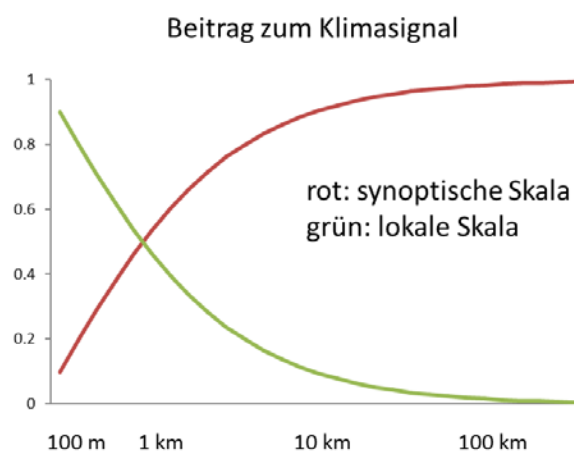


Abb.9.1: Relativer Beitrag von synoptischer und lokaler Skala zum Klimasignal (schematisch).

10 Weiterer Forschungsbedarf

Das vorliegende Projekt konnte trotz seiner kurzen Laufzeit stichprobenhaft erste Antworten auf die eingangs gestellte Frage geben, welchen Beitrag globaler und regionaler Klimawandel einerseits und Bebauungsänderungen andererseits zur Änderung des Stadtklimas in einem Ballungsraum leisten. Allerdings hat sich auch gezeigt, dass für belastbarere Ergebnisse eine Reihe von weiteren Arbeiten notwendig ist. Diese sind im Folgenden zusammen mit einer Einschätzung der Durchführbarkeit (kurzfristig = unmittelbar durchführbar, kurzer Zeithorizont; mittelfristig = in überschaubarem Zeithorizont durchführbar; langfristig = benötigt längeren Vorlauf an Forschung bzw. Entwicklung) aufgelistet.

Für eine bessere statistische Basis:

- Ensemblesimulationen durchführen (mittelfristig)

Für genauere Ergebnisse:

- Extensive Validierung, auch andere Städte (mittelfristig)
- Ensembles mit 1 km Auflösung und feiner rechnen (mittel- langfristig); dies ist u.a. sinnvoll in Verbindung mit dem folgenden Punkt
- genauere Planungsunterlagen sind notwendig. Dies ist notwendig, um Umfang und Art der Änderungen im Modell besser abbilden zu können (mittelfristig)
- genauere Werte des anthropogenen Wärmeeintrags und Jahresgang des anthropogenen Wärmeeintrags berücksichtigen (kurzfristig)

Für Validierung und bessere Einschätzung der Auswirkungen:

- Auswertung stadtspezifischer Erhebungen stadtklimarelevanter Größen (mittelfristig)
- Ankopplung von Impactmodellen (z.B. Klima-Michel o.ä.) und/oder mikroskaligen Stadtmodellen (kurzfristig)

11 Literatur

- Braun, F.J., Schädler, G., 2005: Comparison of Soil Hydraulic Parameterizations for Mesoscale Meteorological Models. *J. Appl. Meteorol.* 44, 1116-1132.
- Doms, G. and Schättler, U., 2002: A Description of the non-hydrostatic regional model LM, Part I: Dynamics and Numerics, Tech. rep., Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- Hackenbruch, J., Schädler, G., Schipper, J.W., 2016: Added value of high-resolution regional climate simulations for regional impact studies. *Meteorol. Zeitschr.*, 25/3, 291-304.
- Kohler, M., Schädler, G., Gantner, L., Kalthoff, N., Königer, F., Kottmeier, Ch., 2012: Validation of two SVAT models for different periods during the West African monsoon *Meteorol. Z.*, 21, 509-524.
- Meissner, C., Schädler, G., 2007: Modelling the Regional Climate of Southwest Germany: Sensitivity to Simulation Setup. In: High Performance Computing in Science and Engineering '07: Transactions of the High Performance Computing Center, Stuttgart (HLRS) 2007.
- Oke, T.R., 1987: *Boundary Layer Climates*. Chapman & Hall.
- Panitz, H.-J., Dosio, A., Büchner, M., Lüthi, D., and Keuler, K, 2013.: COSMO-CLM (CCLM) climate simulations over CORDEX-Africa domain: analysis of the ERA-Interim driven simulations at 0.44_ and 0.22_ resolution, *Climate Dynamics*, pp. 1–24.
- Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., Gratzki, A. 2013: A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 22, No. 3, 235–256.
- Rockel, B., Will, A., and Hense, A., 2008: The regional climate model COSMO-CLM (CCLM), *Meteorologische Zeitschrift*, 17, 347–348.
- Rutter, N., et al. (43, including G. Schädler), 2009: Evaluation of forest snow processes models (SnowMIP2). *J. Geophys. Res.*, 114, D06111, doi:10.1029/2008JD011063.
- Schädler G., 1990: Triggering of atmospheric circulations by moisture inhomogeneities of the Earth's surface. *Boundary Layer Meteorol.* 51: 1–29.
- Schädler G., 2007: A Comparison of Continuous Soil Moisture Simulations Using Different Soil Hydraulic Parameterisations for a Site in Germany. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 46, 1275-1289, doi: 10.1175/JAM2528.1.
- Schlünzen, K.H., Grawe, D., Bohnenstengel, S.I., Schlüter, I., Koppmann, R. , 2011: Joint modelling of obstacle induced and mesoscale changes – current limits and challenges.

Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 99:217–225. doi:
10.1016/j.jweia.2011.01.009

Städtebauliche Klimafibel 2012: http://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima_fibel

Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012: Local climate zones for urban temperature studies. Bull Am Meteorol Soc 93:1879–1900. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

Uppala et al., 2005: The ERA-40 re-analysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 131 (2005), 2961-3012. <http://dx.doi.org/10.1256/qj.04.176>

Valcke, S., 2013: The OASIS3 coupler: a European climate modelling community software, Geosci. Model Dev., 6, 373-388, doi:10.5194/gmd-6-373-2013.